



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO EROZI MATERIÁLU VODNÍM
PAPRSKEM**

DESIGN OF DEVICE FOR WATER JET EROSION OF MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Mikulášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Tomáš Mikulášek**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Paprsek dopadající na rotující desku se vzorkem materiálu způsobuje jeho erozi. Zatím nebyl ověřen stupeň eroze a charakter oderodovaného materiálu. Návrh a experimentální testování daného zařízení může přinést nové informace o tvorbě mikroprášků.

Cíle diplomové práce:

1. Úvod, definice základních pojmů, formulace problému
2. Rešerše týkající se eroze materiálu dopadajícím kapalinovým paprskem
3. Návrh experimentu pro erozi vodním paprskem na rotujícím vzorku
4. Realizace a vyhodnocení experimentu
5. Výpočtové modelování dopadu paprsku na rotující stěnu

Seznam literatury:

Necker, J., Pelz, P.F., Keil, T.: Erosion im Tropfenschlagversuch – Vergleich zur Kavitationserosion, Kolloquium zu Kavitation und Kavitationserosion, 2014

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cílem diplomové práce bylo navržení experimentu pro erozi planárních vzorků vodním paprskem na rotujícím vzorku, realizace experimentu a jeho vyhodnocení pomocí 3D optodigitálního mikroskopu Olympus DSX 510. Byly porovnány eroze způsobené dopadajícím vodním paprskem a kavitační eroze. Experiment byl realizován pro tlak vody v okruhu 0,432 MPa, 1,5 MPa na rotujícím vzorku, 2,5 MPa na nepohyblivém vzorku a zanořeném vzorku v různých časových intervalech. Experiment dopadu vodního paprsku na rotující vzorek byl porovnán s CFD výpočtem. Výpočtové modelování bylo provedeno ve dvou částích: 3D modelování dopadu vodního paprsku na nepohyblivou stěnu a 3D modelování dopadu vodního paprsku na pohyblivou stěnu. Jednalo se o dvoufázové proudění, které bylo řešeno pomocí výpočtového modelu Volume of Fluid, jehož cílem bylo zjistit, jak bude v jednotlivých případech vypadat proudění vody a jak se změní velikost síly dopadajícího vodního paprsku na stěnu.

Abstract

The aim of this diploma thesis was to design experimental setup for planar samples erosion by means of the water jet on the rotational sample configuration, laboratory experimental testing and its evaluation by means of the 3D optodigital microscope Olympus DSX 510. There were observed typical erosion patterns at the solid tested material surfaces as well as the cavitation erosion. Experiments were carried out at the following water pressures: 0.432 MPa, 1.50 MPa on the rotating sample, at 2.50 MPa on steady sample and on flooded sample for different treatment times. Experimental results of waterjet impact on rotating sample were compared with the theoretical modelling data obtained by CFD modelling. Computational modelling was done in two parts: 3D modelling of water jet flow impact on rigid steady surface and 3D modelling of water jet impact on rigid moving surface. The latter modelling was solved as two phase modelling, where the computational model "Volume of Fluid" was employed. The aim of the study was to find out for the individual cases under study appearance of the water flow and the changes of the magnitude of the force of the impinging water jet on the wall.

Klíčová slova

vodní paprsek, eroze materiálu, dopad vodního paprsku na rotující stěnu, CFD, Fluent, dvoufázové modelování,

Key words

water jet, material erosion, doplet impact on rotating surface, CFD, Fluent, two phases modeling

Bibliografická citace mé práce:

MIKULÁŠEK, T. *Návrh zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Návrh zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne:

Bc. Tomáš Mikulášek

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří mi byli při vypracování této diplomové práce nápomocni. Zvláštní poděkování patří panu doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D za cenné připomínky, rady a odborné vedení této diplomové práce. Dalé bych chtěl poděkovat všem pracovníkům laboratoře Oboru fluidního inženýrství za realizaci experimentu a Ing. Miroslavě Horynové Ph.D za vyhodnocování vzorků po experimentech.

Obsah

1. Úvod	15
2. Vodní paprsek	16
2.1 Struktura vodního paprsku	17
2.2 Definice problému dopadající stlačitelné vodní kapky	18
2.3 Zahájení deformace při dopadu čistého vodního paprsku	22
2.3.1 Vysokorychlostní proud kapaliny přes zasažený povrch	23
2.3.1 Eroze materiálu pulzujícím vodním paprskem	24
3. Dopadající vodní paprsek vs. kavitační eroze	26
3.1 „Kavitační mlýn“	26
3.1.1 Kavitace a kavitační eroze	27
3.2 Dopadající vodní paprsek	29
3.2.1 Eroze dopadajícím vodním paprskem	29
3.3 Porovnání vlivu dopadajícího vodního paprsku a kavitační eroze	32
4. Návrh experimentu pro erozi vodním paprskem na rotujícím vzorku	34
4.1 Princip a funkce	35
5. Realizace experimentu a jeho vyhodnocení	36
5.1 Testovací zařízení na erozi materiálu vodním paprskem	36
5.2 Testování eroze materiálu pro tlak vody v okruhu $p = 435 \text{ kPa}$	38
5.2.1 Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 435 \text{ kPa}$ a dobu trvání experimentu 8 hodin	40
5.2.2 Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 435 \text{ kPa}$ a dobu trvání experimentu 16 hodin	44
5.3 Testování eroze materiálu pro tlak vody v obvodu $p = 1,5 \text{ MPa}$	47
5.3.1. Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 1,5 \text{ MPa}$ a dobu trvání experimentu 8 hodin a 16 hodin	49
5.4 Testování eroze materiálu pro tlak vody v okruhu $p = 2,5 \text{ MPa}$, dopad přímého nepřerušovaného vodního paprsku a použití trysek o průměru 1,5 mm	49
5.4.1 Vyhodnocení experimentu pro hladký vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 10 mm	51
5.4.2 Vyhodnocení experimentu pro hladký vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 100 mm	52
5.4.3 Vyhodnocení experimentu pro drsný vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 10 mm	53

5.4.4 Vyhodnocení experimentu pro drsný vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 100 mm.....	53
5.5 Vzorek materiálu umístěn pod hladinou ve vzdálenosti 10 mm.....	54
5.5.1 Vyhodnocení hladkého vzorku materiálu umístěného ve vzdálenosti 10 mm pod hladinou	55
5.5.2 Vyhodnocení drsného vzorku materiálu umístěného ve vzdálenosti 10 mm pod hladinou	57
6. Výpočtové modelování dopadu paprsku na rotující stěnu	58
6.1. Výpočetní doména	58
6.2 Výpočetní síť.....	59
6.3 Výpočetní model	61
6.4 Vyhodnocení výpočtu.....	63
6.4.1 Nepohybující se stěna.....	63
6.4.2 Pohybující se stěna	66
7. Závěr.....	72
8. Použitá literatura	74
9. Seznam použitých zkratk a symbolů	76

1.Úvod

Vodní paprsek je v technické praxi často využíván k řezání materiálu, odstraňování okují apod. V důsledku působení vodního paprsku na materiál dochází k jeho erozi, která způsobuje úbytek materiálu v podobě mikroprášku. Ten může mít další využití v praxi, například pro plazmové pokovování.

Diplomová práce je rozdělena do tří částí. První část (teoretická) pojednává o struktuře vodního paprsku a jeho chování při dopadu na pevný povrch. V této části jsou rozebrány erozivní účinky kontinuálního a přerušovaného vodního paprsku na materiál a jeho povrchová deformace. Poslední kapitola teoretické části se zabývá porovnáním eroze materiálu při dopadu přerušovaného vodního paprsku a eroze materiálu pomocí kavitace v takzvaném „Kavitačním mlýně“.

Druhá část diplomové práce je věnována návržení experimentů týkajících se eroze materiálu. Tento pokus probíhal v několika režimech. V prvním případě se sledoval vliv dopadu vodního paprsku na rotující vzorek materiálu, a to pro tlak vody v okruhu 0,432 MPa a 1,5 MPa, po dobu 8 a 16 hodin. Poté se provedl experiment, kdy vodní paprsek dopadal na nepohyblivý vzorek materiálu, kdy tlak vody v okruhu byl 2,5 MPa po dobu 8 hodin. Poslední experiment spočíval v tom, že se vzorek materiálu i s tryskou zanořil pod vodní hladinu po dobu 8 hodin a byl sledován úbytek materiálu způsobený kavitační erozí.

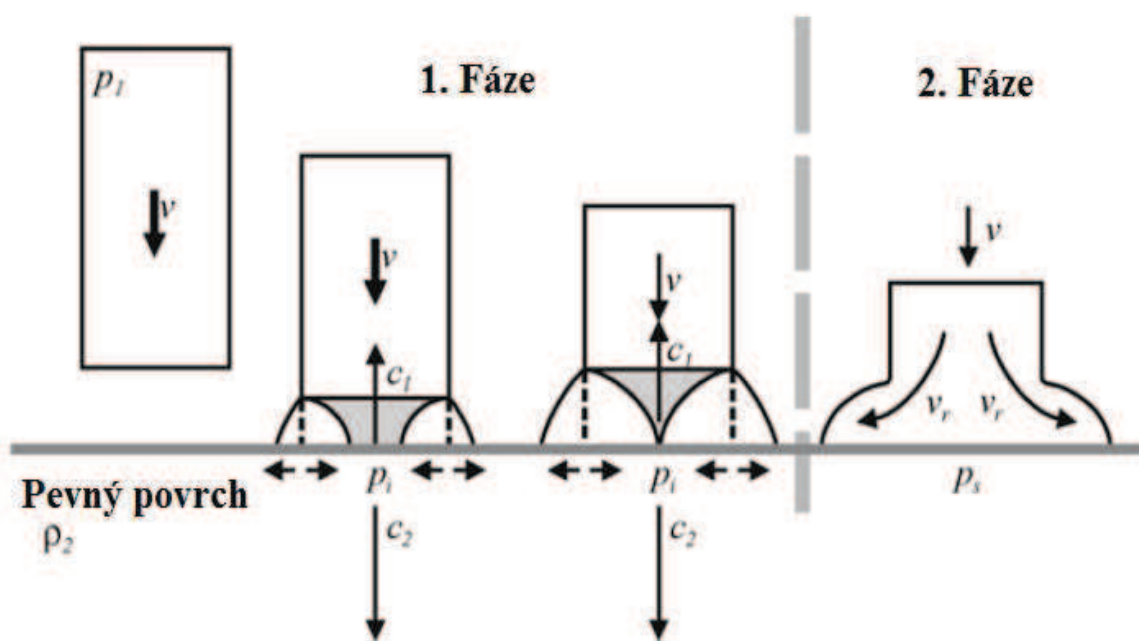
Poslední část diplomové práce se zabývá výpočtovým modelováním daného problému. Bylo zkoumáno proudění napříč výpočtovou doménou a sledováno, jak se změní velikost síly dopadajícího paprsku na nepohyblivou a pohyblivou pevnou stěnu. Tento problém byl řešen jako 3D dopad vodního paprsku na nepohyblivou stěnu a následně pak jako 3D dopad vodního paprsku na pohyblivou stěnu. Protože se jednalo o dvoufázové proudění voda - vzduch, byl výpočet řešen pomocí výpočtového modelu Volume of Fluid.

Vyhodnocení Experimentů bylo prováděno ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství.

2. Vodní paprsek

Eroze materiálu dopadajícími vodními kapkami je jedním z častých problémů v technické praxi. Vyskytuje se v mnoha oblastech použití strojů, jako například: průlet letadla deštěm, eroze lopatek parní turbíny, kavitační eroze, nebo při záměrné erozi materiálu při jeho čištění a řezání [1].

Při dopadu vysokorychlostního proudu kapaliny na tuhý povrch vzniká krátký vysokotlaký puls v místě dopadu kapaliny na povrch materiálu. Tento tlak může způsobovat vážné poškození materiálu, jak na jeho povrchu, tak i v jeho struktuře. Dopad kapaliny na povrch lze rozdělit do dvou fází Obr.1.



Obr. 1 Dvě fáze dopadu kapaliny na povrch [2].

V první fázi se kapalina chová jako stlačitelná. Při této fázi vzniká hydraulický ráz, ten je zodpovědný za nejvíce poškození při dopadu kapaliny na pevný povrch. Normálový maximální tlak při dopadu p_i je dán vztahem [2,4]:

$$p_i = \frac{v\rho_1c_1\rho_2c_2}{\rho_1c_1 + \rho_2c_2} \quad (1)$$

kde v je dopadová rychlost kapaliny, ρ_1, ρ_2 je hustota kapaliny a tuhého tělesa a c_1, c_2 jsou rychlosti šíření tlakové vlny v kapalině a pevném tělese. Pro většinu kovových materiálů jsou hodnoty ρ_2, c_2 řádově větší než ρ_1, c_1 pro vodu. Při těchto podmínkách můžeme zjednodušit vztah pro tlak při dopadu kapaliny na [2,4]:

$$p = v\rho_1c_1 \quad (2)$$

Při počítání tlaku pro vysokorychlostní dopad kapaliny je důležité znát přibližnou hodnotu rychlosti šíření tlakové vlny c_1, c_2 . Tato přibližná hodnota pro c , je dána vztahem:

$$c = v_s + kv \quad (3)$$

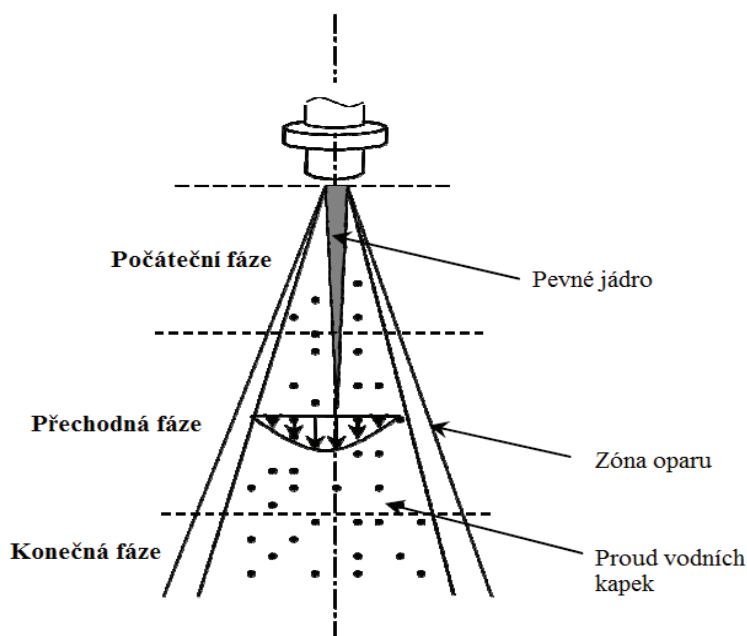
kde v_s je rychlost zvuku a k je numerická konstanta. Pro dopad vody na pevný povrch je do rychlosti $v = 1000$ m/s konstanta $k = 2$ a rychlost zvuku v_s kolem 1480 m/s [2,4].

Po uvolnění tlaku při dopadu kapaliny začne druhá fáze dopadu. Při překonání meze tlakové deformace kapaliny se začne kapalina chovat nestlačitelně. Následně začne proudit radiálně kolmo k ose vodního paprsku podél dopadové plochy. Poté tlak v centrální ose klesne mnohem níž, na Bernoulliho stagnační tlak p_s , který zde vydrží poměrně dlouhou dobu. Stagnační tlak je dán vztahem [2]:

$$p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (4)$$

2.1 Struktura vodního paprsku

Vodní paprsek má 3 fáze: počáteční, přechodnou a konečnou fázi. V počáteční fázi lze předpokládat, že paprsek je pevný a kontinuální, s velkým axiálním dynamickým tlakem a s velmi malým obsahem vzduchu. Předpokládá se, že rychlost na konci klínového kužele na konci počáteční fáze je stejná, jako rychlost na výstupu z trysky, jak je ukázáno na Obr. 2. Nachází se zde i zóna oparu, která se začíná formovat od hrany trysky. Toto je zóna, kde se začíná míchat voda se vzduchem a začínají se tvořit víry. Na konci počáteční fáze začne vodní paprsek reagovat se vzduchem, což vede k jeho rozpadu na kapičky - tento jev značí přechodnou fázi. Kontinuální interakce mezi vodním paprskem a okolním vzduchem napříč přechodnou fází vede k většímu rozpadu vodního paprsku na kapičky. To vede následně ke snížení rychlosti vodního paprsku (nyní vodních kapek) a rozšíření účinného pole proudění. Přechodná zóna se typicky používá pro úpravu vzorku vodním paprskem. Potom, co proud vody opustí přechodnou fázi, vstoupí do konečné fáze. Zde nastává velká disipace energie a to v takové míře, že voda není schopná efektivně modifikovat povrch vzorku - tato fáze je nepoužitelná [3].

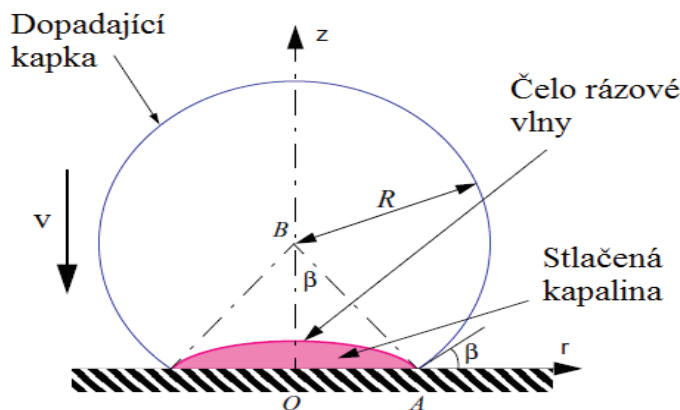


Obr. 2 Změna struktury paprsku se vzdáleností od trysky [3].

2.2 Definice problému dopadající stlačitelné vodní kapky

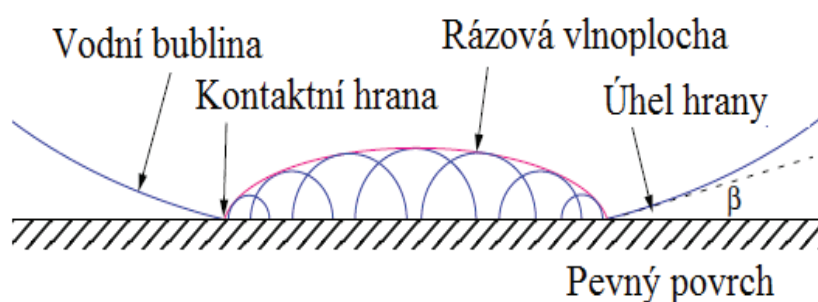
Vliv dopadu proudu vodních kapek, nebo jak bude prezentováno v experimentu, dopad vodního paprsku na rotující disk, je velmi komplexní problém a nelze ho jednoduše analyzovat. Tento problém se dá však zjednodušit uvažováním pouze první fáze dopadu, než se objeví patrný průtok kapaliny. Při tomto zjednodušení je možno zkoumat velikost a rozložení síly dopadu a zjistit, při jakém jejím rozsahu je pozorovatelné erozivní poškození [4].

Geometrie dopadající vodní kapky vysokou rychlostí na dokonale pevný povrch je zobrazena na Obr. 3 [5].



Obr. 3 Vliv dopadající kapky na pevný povrch [5].

Vodní kapka se pohybuje rychlostí v kolmo na stěnu, s počáteční hustotou ρ_0 a okolním tlakem p_0 . Při první fázi dopadu je kapalina přilehlá k pevnému povrchu vysoce stlačená, avšak zbytek kapaliny zůstává nedotčen, proudí původní rychlostí. Důvodem tohoto jevu je, že okraj mezi kontaktem kapaliny a pevného povrchu roste rychleji než stlačená vlnoplocha, která roste rychlostí zvuku (obr. 3). Tyto dva stavy zůstávají oddělené čelem rázové vlny, která je přichycená k rychleji se pohybující kontaktní hraně a cestuje skrz kapalinu. Stlačená kapalina je připoutána mezi rázovou vlnoplochou a pevným povrchem. Rychlost kontaktní hrany je pak stanovena podle geometrie dopadového povrchu. Jak úhel β mezi kontaktní hranou a hranou dopadového povrchu roste, tak rychlost kontaktní hrany klesá na menší, než je rychlost rázové vlny. Když se dostane rázová vlna před kontaktní hranu, stlačená kapalina unikne ve formě vysokorychlostního proudu do vzduchu [4,5].



Obr. 4 Dopad kapky na povrch [5].

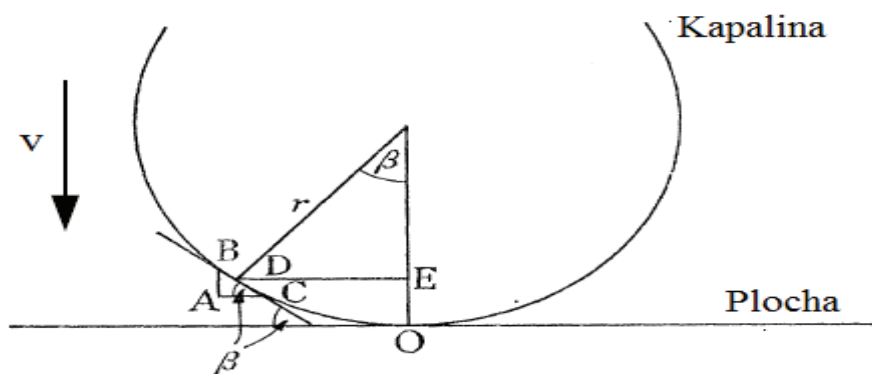
Při dopadu kapky vzniká rázová vlna odděleně od nezasažené části kapaliny. Přesné čelo rázové vlnoplochy vznikne konstrukcí obálky okolo všech vznikajících malých rázových vln daných rozšiřující se kontaktní hranou Obr. 4 [5].

Hnací silou vysokorychlostního proudu je tlak za čelem rázové vlny. Tlak v oblasti stlačené kapaliny není všude stejný a svého maxima dosahuje právě v blízkosti čela rázové vlny. Dočasněho maxima tlaku bude dosaženo právě v okamžiku, kdy se rázová vlna přehne přes kontaktní hranu. Počáteční hodnota tlaku při prvním kontaktu kapaliny s dopadovým povrchem je dána vztahem (1). Velikost tlaku při dopadu není závislá na geometrii kapky kapaliny, avšak doba jeho trvání je závislá na její velikosti a tvaru. Tento tlak vydrží po krátký časový okamžik $\Delta\tau$, po uvolnění tlakové vlny. Tato doba může být vyjádřena jako:

$$\Delta\tau = \frac{3rv}{2c^2} \quad (5)$$

kde r je poloměr kruhu kapky nebo válce v kontaktním regionu. Rychlost rázové vlny c není konstantní a může být aproximovatelná jako rychlost zvuku pouze při nízkých dopadových rychlostech [2,4,5].

Obr. 5 značí kouli kapaliny a dopadovou plochu v řezu [4].



Obr. 5 Řez přes kouli kapaliny a dopadovou plochu [4].

Pro rázovou vlnu mimo oblast kontaktu platí: vlna vznikající v bodě C se musí dostat do bodu B dříve, než plocha povrchu dorazí do bodu B. Pokud má kapka kapaliny rychlost v , tak platí pro rázovou vlnu, aby se pohybovala rychleji než plocha:

$$\frac{v}{c} < \sin \beta \quad (6)$$

kde β je úhel mezi kontaktní hranou a hranou dopadového povrchu a c je rychlost rázové vlny. Limit tlakové deformace kapky je pak dán vztahem:

$$\frac{v}{c} = \sin \beta \quad (7)$$

zatímco odpovídající maximální šířka kontaktní plochy je dána (AB):

$$2r \sin \beta = 2r \frac{v}{c} \quad (8)$$

kde r je poloměr válce. Na šířce této kontaktní plochy je pak tlak impaktu p , za předpokladu absolutně pevného povrchu, dán vztahem pro tlak při vodním rázu (2). Tento vztah značí maximální tlak, jaký může při dopadu vzniknout. Síla F podél vzorku je v této fázi dána:

$$F = \rho c v 2r \frac{v}{c} \quad (9)$$

Když se dosáhne limitu tlakové deformace dané vztahem (7), dochází k bočnímu výtoku kapaliny. Další chování kapaliny je pak mnohem komplexnější a dané zjednodušení už pak není dostačující. Při konečné fázi dopadu, kdy se dopadová plocha nachází v půlce válce, je možno očekávat, že bude dosaženo plného nestlačitelného proudění. Pak maximální tlak podél středu válce bude dán vztahem (4) [2,4].

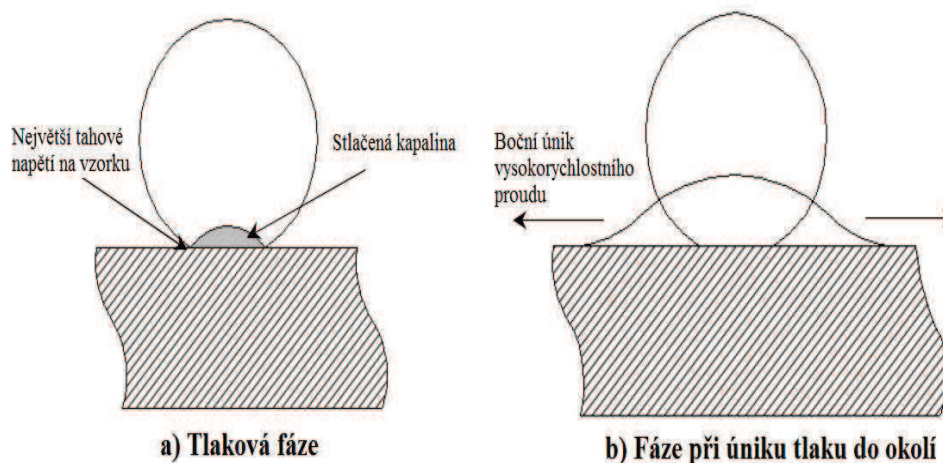
Kromě normálových sil působících na povrchu, jsou zde také smykové síly spojené s vysokorychlostním prouděním na povrchu tělesa. Při vysokorychlostním

proudění od 100 do 400m/s přes hladký povrch, jsou tyto smykové síly velmi malé a nepůsobují poškození. Pokud je však povrch jakkoliv poškozen, vznikají velmi velké smykové síly srážkou proudu s nerovným povrchem. Pro menší dopadové rychlosti, kolem 90 m/s, jsou smykové síly působící na zdrsňený povrch dostatečně velké na způsobení lokálních smykových zlomenin i u velmi pevných materiálů [2,4].

Při erozi materiálu během dopadajícího paprsku mohou nastat v jeho přechodné fázi tyto hlavní mechanismy porušení:

- přímá deformace
- šíření rázové vlny
- boční odtok vysokorychlostního proudu
- hydraulický průnik

Sekvence dopadu může být rozdělena na dvě hlavní fáze: a) fáze založená na tlaku před bočním odtokem vysokorychlostního proudu (obr. 6a) b) fáze při úniku tlaku do okolí, jakmile se kapka zhroutí na povrchu (obr. 6b). Během fáze a) se kontaktní zóna začíná zvětšovat a nerovnoměrná distribuce tlaku dosahuje svého maxima. Toto vede ke vzniku dilatací a Rayleighho povrchových vln v materiálu. Poškození se objeví na špičkách tahového napětí, které se budou vyskytovat na hranicích stlačené zóny. Porušení materiálu může také nastat při interakci mezi bočním odtokem vysokorychlostního proudu s malými trhlinami, které jsou rozloženy po délce dopadové zóny [3].



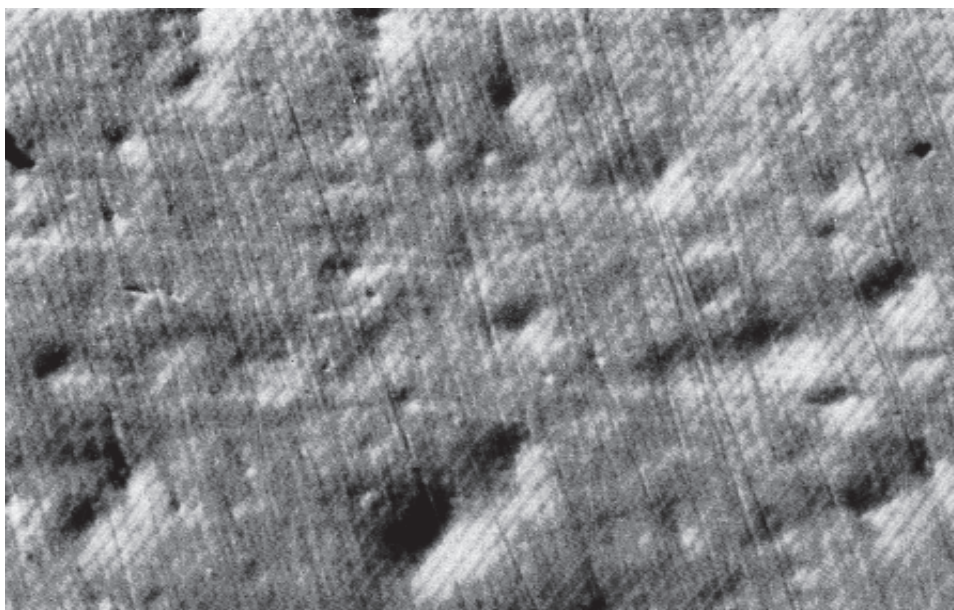
Obr. 6 a) Fáze založená na tlaku, b) Fáze při úniku kapaliny do okolí [3].

2.3 Zahájení deformace při dopadu čistého vodního paprsku

Čistý vodní paprsek se pro řezání materiálu nepoužívá. Používá se převážně pro čištění, frézování a perličkování. Z důvodu většího úběru materiálů se v praxi více používá vodní paprsek s přidáním abraziva. Tato metoda by však pro náš experiment nebyla příliš vhodná z toho hlediska, že je požadováno získání odebraného mikroprášku ze vzorku. Přidaná abraze ve vodním paprsku by tento mikroprášek kontaminovala [7].

Jako první stádium deformace, skoro všech kovových materiálů opakovaně zasažených vodním paprskem, se objeví malé plastické důlky roztroušené po celé zasažené ploše. Tyto důlky, které se objevují už velice brzy v historii eroze materiálu, jsou formovány velikostí dopadajícího tlaku, který je mnohokrát menší než ten, který způsobuje pružnou deformaci v daném materiálu. Na výskyt těchto důlků má vliv: 1) nerovnoměrné rozložení tlaku po zasažení povrchu a 2) výskyt slabých míst v materiálu, v místech, kde tyto důlky vzniknou.

Je také důležité vědět, jak je materiál při dopadu paprsku zatížen. Protože při dopadu paprsku je zatížení rozloženo rovnoměrně po celé ploše, ne jako u zatížení pevným materiálem v jednom bodě, je každé slabší místo náchylné k působení napětí. Pokud je toto napětí dostatečně velké, materiál se pod ním může deformovat [8].

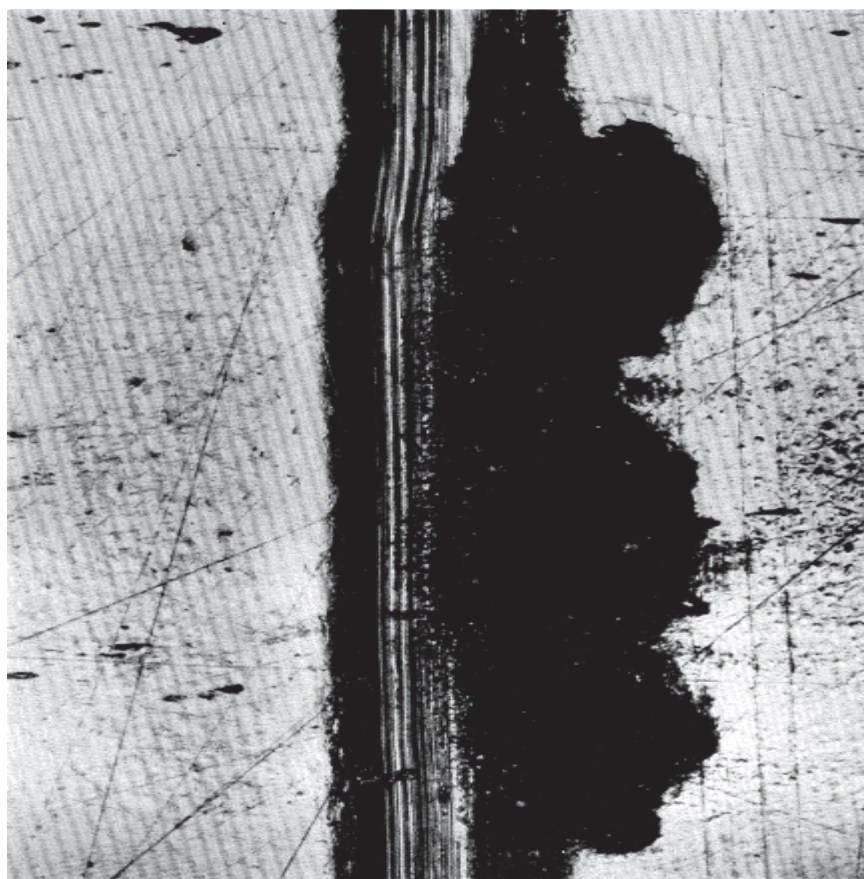


Obr. 7 Povrchové důlky ve vzorku mědi při 4000 dopadových cyklech a rychlosti dopadu 50m/s [8].

Na obr. 7 můžeme vidět povrchové důlky na vzorku mědi, který byl vystaven opakujícímu se dopadu vodního paprsku. To znamená, že důlky vznikají v slabších místech materiálu, a to i při relativně nízkém dopadovém tlaku. Je jasné, že tato místa dislokační struktury krystalu jsou náchylná ke skluzu i při velmi nízkém napětí. Pokud tento důlek vznikne, efekt zpevňování materiálu v něm může způsobit větší koncentrace napětí. To značí, že aplikované napětí by mělo být vždy větší než lokální mez kluzu, a pak důlky porostou s velikostí následného dopadu [8].

2.3.1 Vysokorychlostní proud kapaliny přes zasažený povrch

Mechanismus poškození materiálu není způsoben pouze přímým dopadem paprsku, ale může být způsoben i efektem vysokorychlostního proudu kapaliny přes zasažený povrch vzorku. Předpokládá se, že smykové síly jsou dostatečně velké, aby způsobily poškození. Když materiál obsahuje důlky, tyto důlky brání dalšímu proudění kapaliny. Bylo zjištěno, že povrch materiálu, který byl vyleštěn a bez vad, bude odolávat působení proudící kapaliny po danou dobu bez zřejmého poškození, zatímco povrch materiálu, obsahující vady nebo nerovnoměrnosti, vykazuje značný úbytek materiálu za stejných podmínek. Na Obr. 8 je mikroskopický snímek vzorku mědi vystaveného dopadové rychlosti 300 m/s pod úhlem $4^{\circ} 40'$ po dobu 1 minuty. Povrch byl původně označen drážkou ležící kolmo na tok kapaliny. Jak je možno vidět, materiál byl odstraněn z hran drážky čelící toku kapaliny. Vyleštěný povrch nevykazuje žádné rozeznatelné poškození při stejném zacházení [8].

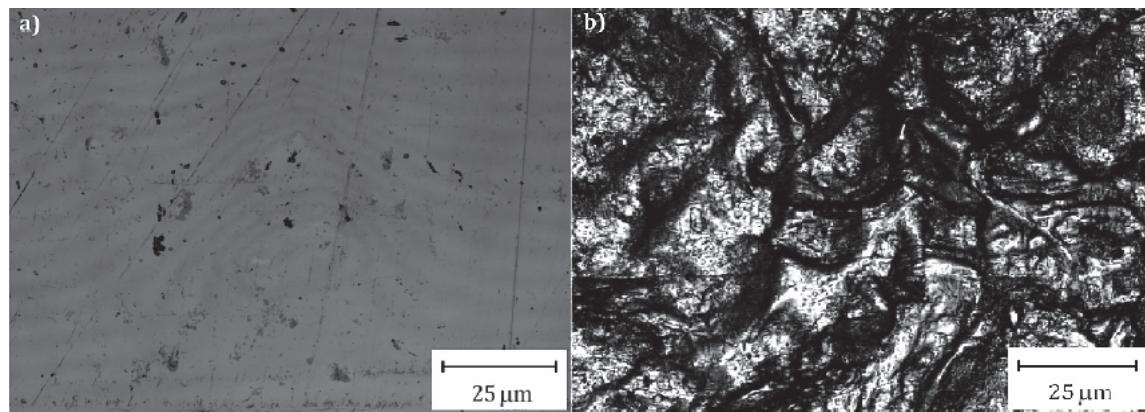


Obr. 8 Vzorek mědi při dopadové rychlosti 300 m/s pod úhlem $4^{\circ} 40'$ po dobu 1 minuty [8].

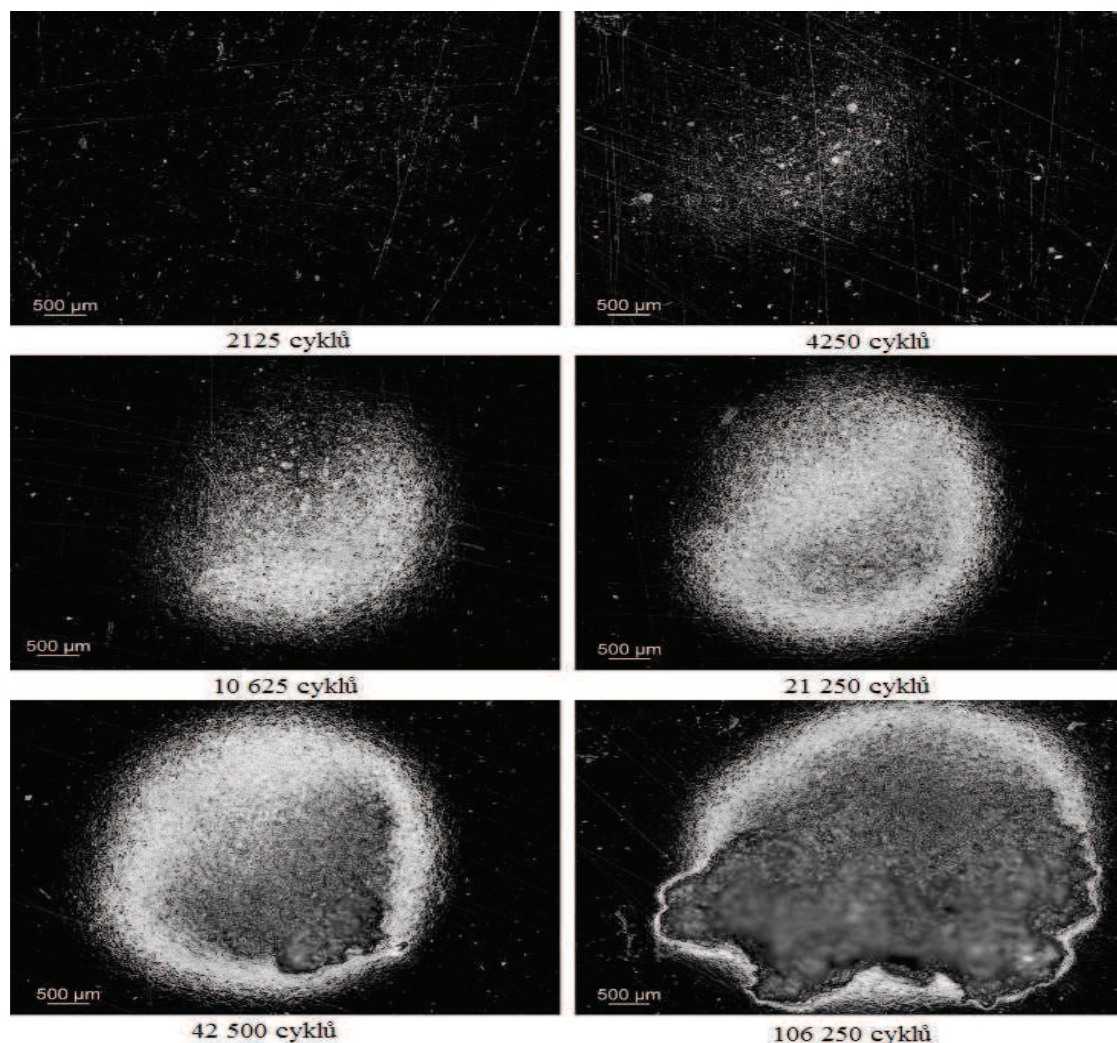
2.3.1 Eroze materiálu pulzujícím vodním paprskem

Eroze nerezové oceli při vystavení pulzujícímu vodnímu paprsku začíná zhrubnutím povrchu a vytvořením malých povrchových důlků (Obr. 9a). Tyto důlky rychle rostou vlivem dalších dopadových cyklů a stále tvoří další, nové. Je možno pozorovat dodatečné účinky deformace, a to například poškozování zrna, viditelné na jeho hranicích. Některá erodovaná místa značí plastickou deformaci [9].

Při rostoucím počtu cyklů pulzujícího vodního paprsku roste i drsnost povrchu a hranice zrn jsou erodovány, jak dopadovým tlakem, tak smykovými silami při odtoku vysokorychlostního proudu přes materiál a vznikají důlky. Tyto důlky se následně šíří a spojují se při dalších dopadových cyklech, aby vytvořily erozivní kráter v materiálu. Fázi této eroze je možno charakterizovat pomocí značného úbytku materiálu. Další dopadové cykly pak prohlubují tento kráter. Průběh eroze materiálu nerezové oceli od vytvoření důlků, až po vznik kráteru, ukazuje Obr. 10 [9].



*Obr. 9 Nerezová ocel vystavená pulzujícímu paprsku při tlaku 30MPa a) 10 625 cyklů
b) 100 250 cyklů [9].*



Obr. 10 Mikrograf eroze vznikající na nerezové oceli při dopadu pulzujícího paprsku [9].

Celkově tedy vznikají tři fáze eroze materiálu při opakujících se dopadech pulzujícího vodního paprsku. První fáze, neboli počáteční fáze, může být charakterizována plastickou, nebo křehkou deformací na zasaženém povrchu. Při této fázi však nevzniká žádná eroze materiálu. O druhou fázi se jedná, když začínají vznikat první jamky, roste úbytek materiálu a tyto jamky pokryjí celou dopadovou oblast. Eroze materiálu dosáhne v této fázi svého maxima. Při třetí fázi se jamky spojí a vytvoří erozivní kráter. V průběhu této fáze klesá úbytek materiálu, protože erodovaná oblast zůstává zhruba stejná a mění se pouze hloubka kráteru [9].

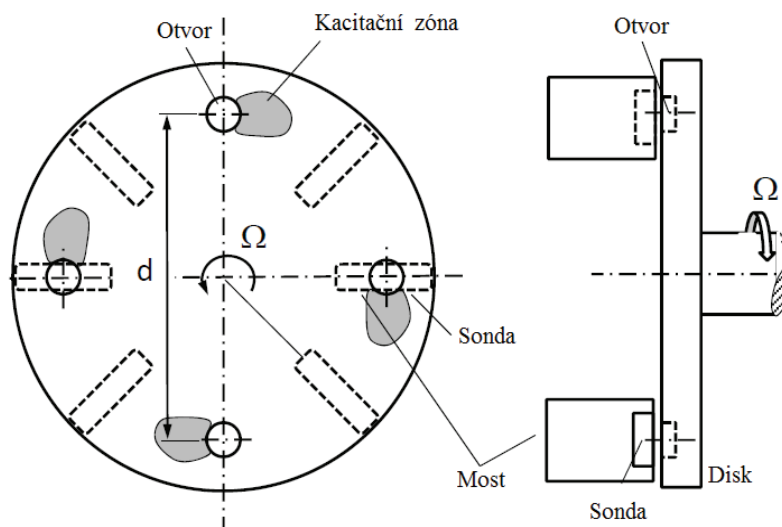
3. Dopadající vodní paprsek vs. kavitační eroze

Implodující kavitační bublina může poškodit příslušné komponenty v hydraulických systémech. Kavitace je složitý jev, při kterém vznikají a zanikají dutiny v proudící kapalině. Vzniká tak, že při snížení tlaku v kapalině na tlak nasycených par při dané teplotě kapaliny se kapalina začne odpařovat a začínají se tvořit velmi malé bublinky. Tyto bublinky jsou unášeny proudem kapaliny do oblasti vyššího tlaku, kde pára v bublinách začne kondenzovat a vzniknou kavitační dutiny. Do těchto dutin začne vnikat kapalina velkou rychlostí a po jejich zaplnění dochází k velkému rázu. Pokud ráz nastane na povrchu obtékaného materiálu, je tento materiál velice namáhán a rozrušován, tlakové špičky při tomto jevu mohou dosáhnout až několik stovek MPa. Jednou z možností, jak kvantifikovat intenzitu kavitace, je použití povlakování měkkými kovy, například mědí, při homologních modelových zkouškách. Povlak je vystaven zanikajícím kavitačním bublinám, dokud se neobjeví plastická deformace, nebo není zjištěn úbytek materiálu. Avšak toto testování materiálu je velice časově náročné. Pro speciální měření, jako je určení křivky únavy materiálu a erosivní křivky, se používá například takzvaný „Kavitační mlýn“. Jeho výhodou oproti homogenní modelové zkoušce je, že je rychlejší, dovoluje lepší vizuální přístup a jednodušší interpretaci kavitačního poškození.

Další metodou, při které vzniká podobná deformace jako při kavitační erozi, je možnost použití zkušebního zařízení zkoumajícího vliv dopadajícího paprsku. Na rychle rotující tyč jsou připevněny vzorky materiálu a na ně dopadá vodní paprsek. Povrch vzorku je poškozován dopadajícím vodním paprskem [10,11,12].

3.1 „Kavitační mlýn“

Skládá se z rotujícího disku pohybujícího se úhlovou rychlostí Ω v uzavřené nádobě naplněné vodou. Čtyři otvory na přední straně disku mají za následek snížení lokálního tlaku v dutinách. Při poklesu tlaku na tlak nasycených par, vzniknou čtyři kavitační zóny, které se pohybují spolu s rotujícím diskem. Kavitační zóny pak zanikají na povrchu vzorků, které jsou uchyceny na vyměnitelných, nepohyblivých mostech blízko rotujícího disku. Těchto mostů je šest, ale používají se pouze čtyři z důvodu stejných podmínek proudění, jak je označeno na Obr. 11 [10,11].



Obr. 11 „Kavitační mlýn“ [11].

Kavitační zóna se znovu zregeneruje po zániku na předchozím mostě. Reynoldsovo číslo může být měněno podle rychlosti rotujícího disku:

$$Re = \frac{dv}{\nu} = \frac{d\Omega \frac{d}{2}}{\nu} = \frac{d^2 \Omega}{2\nu} \quad (10)$$

kde **d** je vzdálenost mezi protilehlými otvory na disku, **Ω** je úhlová rychlost disku a **ν** je kinematická viskozita vody. Při experimentu bylo Reynoldsovo číslo $Re=11,5 \cdot 10^6$. Nezávisle na Reynoldsově čísle je kavitační číslo:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{\rho}{2} \left(\frac{d}{2} \Omega \right)^2} \quad (11)$$

p je tlak systému, **p_v** je tlak nasycených par a **ρ** je hustota vody. Kavitační číslo je kontrolováno tlakem systému [10,11].

3.1.1 Kavitace a kavitační eroze

Může být popsáno několik rozdílných stavů kavitačního poškození. Jev kavitace je důkladně popsán v Noskijevič [12]. Když se kulová kavitační bublina stane nestabilní, zhroutí se do sebe a imploduje. Pokud kavitační bublina imploduje v blízkosti povrchu, vzniká na malém povrchu velké zatížení. Pro kvazi-stacionární proces můžeme proces únavy rozdělit do 3 stupňů:

1. Počáteční stupeň

V začátečním stupni vystavení materiálu kavitaci se na povrchu projevuje pouze plastická deformace. V tomto opakujícím se jevu neprobíhá žádný úbytek materiálu. Vyskytují se pouze mále prohloubeniny s rozdílnou hloubkou a průměrem. Empirické korelace mezi

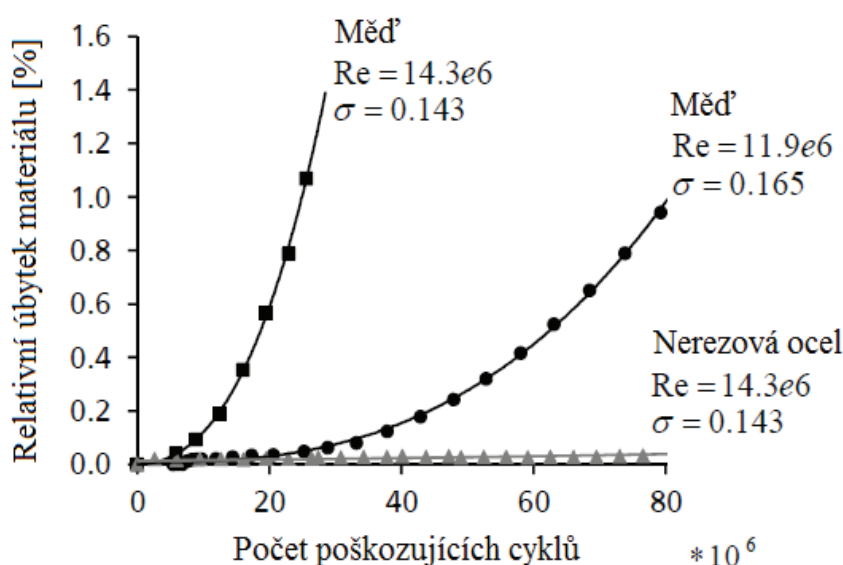
hloubkou prohloubeniny, materiálem a energií, vzniklými na povrchu materiálu, mohou být použity na začátku tohoto stupně, kdy se stále žádné překrývání prohloubenin nestalo, nebo nejsou viditelné žádné hranice zrn.

2. Přechodný stupeň

Po inkubační době se začnou projevovat trhliny na hranicích zrn, což indikuje začátek druhého stupně, ve kterém je materiál porušován na povrchu. Během tohoto stupně se velikosti kousků odtržených od materiálu s časem zvětšují.

3. Stupeň úbytku materiálu

Konečně ve třetím stupni nastává konstantní poměr úbytku materiálu za čas. Velikost odtržených kousků od materiálů se s časem nemění, zůstává stejná [11].



Obr.12 Graf úbytku materiálu pro měď a nerezovou ocel [11].

Obr. 12 ukazuje graf úbytku materiálu v závislosti na počtu poškozujících cyklů při daných podmínkách. Je vidět, že měď se nachází v přechodném stupni a dokonce i ve stupni úběru materiálu, zatímco na nerezové oceli není viditelný žádný úbytek materiálu, nachází se ještě v počátečním stupni [11].

3.2 Dopadající vodní paprsek

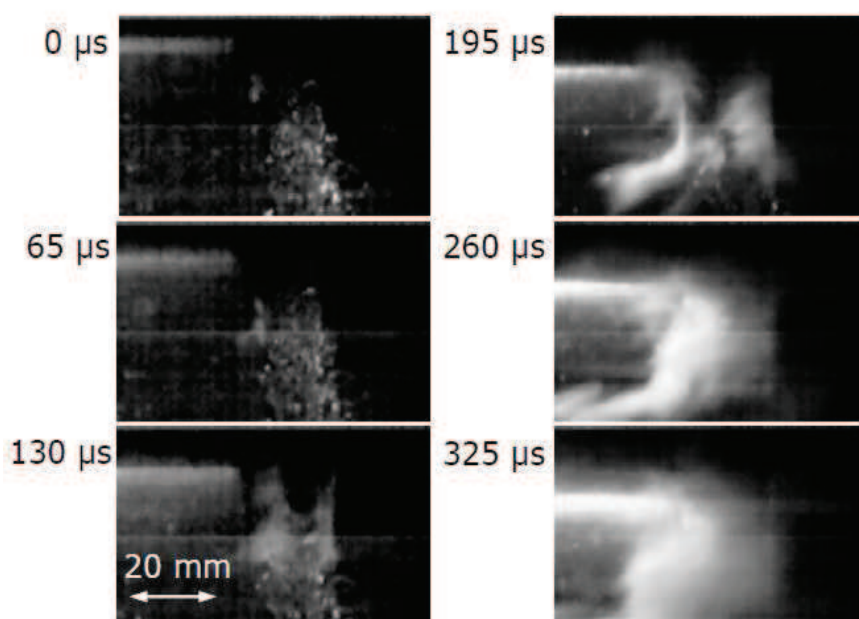
Testovací zařízení na dopadající paprsek (Obr. 13) se skládá z rotujícího ramena, které se pohybuje konstantní rychlostí. Z důvodu obsažení rozdílných úhlových rychlostí mohou být vzorky umístěny na různých poloměrech od osy rotace. Při každé otáčce je vzorek zasažen vodním paprskem [11].



Obr. 13 Zařízení na testování vlivu dopadajícího paprsku [11].

3.2.1 Eroze dopadajícím vodním paprskem

Materiál proletí vodním paprskem a ten se roztříští do malých kapiček za velice krátký čas. Kinetická energie je předána do materiálu a výsledkem toho je plastická deformace materiálu. Na Obr. 14 je vidět dopad paprsku zachycený vysokorychlostní kamerou. Paprsek může být viděn v čase $t=0$, proudí od shora dolů. Vzorek materiálu se pohybuje zprava doleva. Obvodová rychlost je přibližně $v = 70\text{m/s}$ [11].



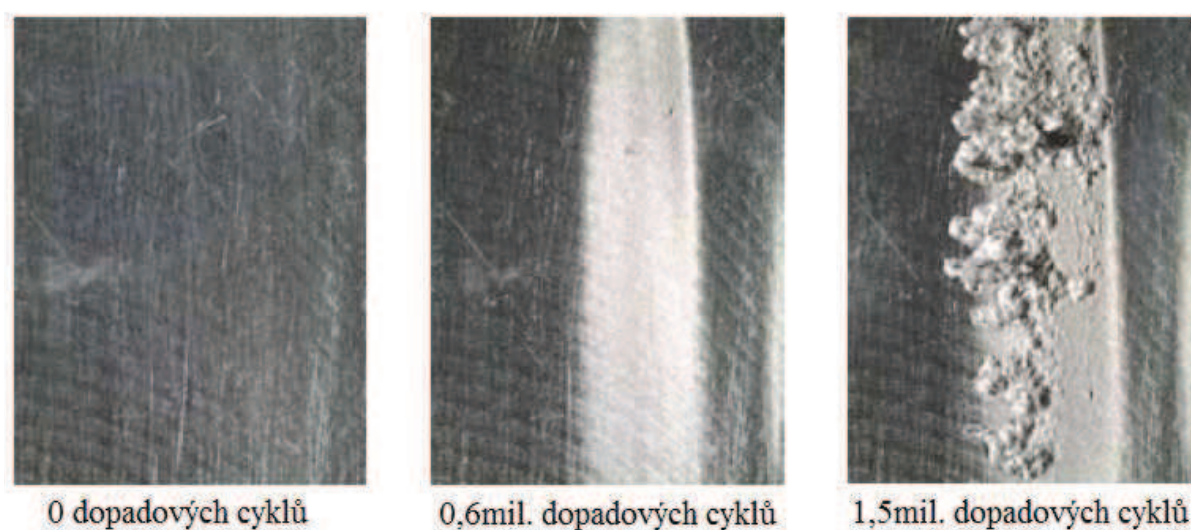
Obr. 14 Vysokorychlostní vizualizace rozpadu vodního paprsku na vodní kapičky [11].

Rozpad vodního paprsku trvá do doby, kdy se vzorek přesune z dosahu vodního paprsku a ten se znovu obnoví. Ani při snímání vysokorychlostní kamerou není zjistitelné, zda-li při rozpadu paprsku vzniká kavitace.

Proces při dopadu paprsku na materiál lze rozdělit do 5 fází. Energie paprsku při dopadu je rozdělena na energii kinetickou, která způsobuje deformaci vzorku a rozpad vodního paprsku při kontaktu s materiálem vzorku, a na energii povrchovou, která způsobuje vznik smykových sil. Kromě toho je část energie spotřebována na ohřev vody a na zpomalení rotace ramena.

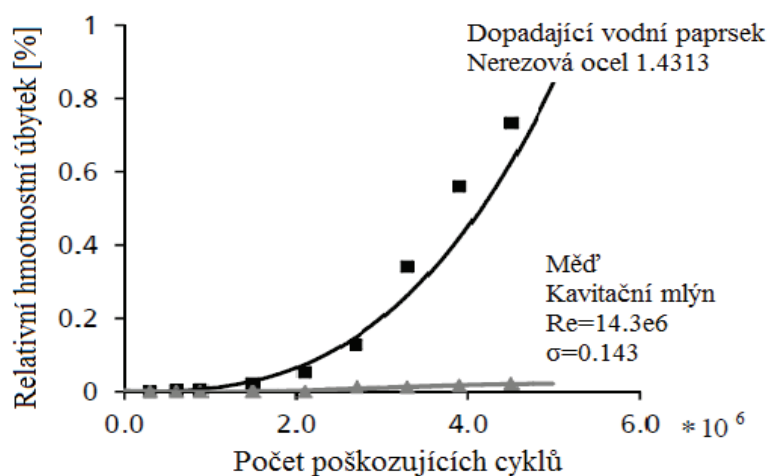
Při počáteční fázi testu je plocha vzorku poškozena promáčklinami o různých hloubkách. Tvar poškození indikuje, že hlavní zatížení povrchu vzorku je způsobeno kapičkami při rozpadu vodního paprsku. Obrázky povrchu při různých časových intervalech inkubační periody jsou na Obr. 15. Analytické zjištění energie potřebné pro deformaci povrchu je velice obtížné z toho důvodu, že není známo spektrum velikosti dopadajících kapiček a také je možné, že k deformaci povrchu může přispět kavitace.

Při překročení inkubační fáze a vstupu do fáze úbytku materiálu byla zjištěna velká agresivita dopadajících kapiček. Pouze při malém počtu dopadů v řádech 10^6 byl povrch nerezové oceli těžce poškozen [11].



Obr. 15 Povrch nerezové oceli 1.4313 v testovacím zařízení [11].

Na obr. 16 můžeme vidět porovnání úbytku materiálu nerezové oceli při testování na zařízení dopadajícího vodního paprsku oproti mědi při testování na kavitačním mlýnu.

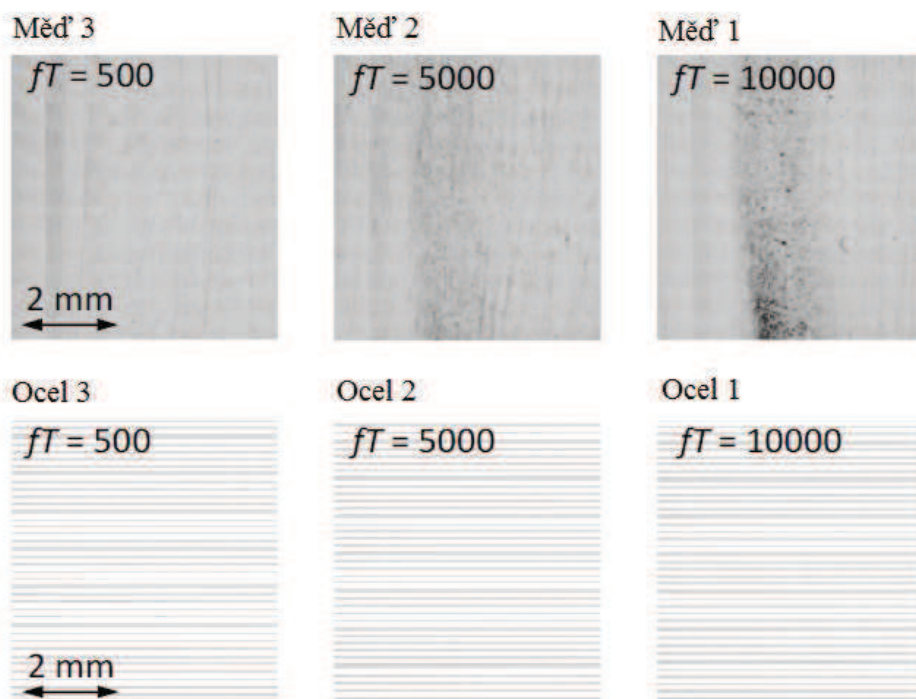


Obr. 16 Porovnání úbytku materiálu při testování na Kavitačním mlýnu vs. Dopadající vodní paprsek [11].

Je zajímavé, že nejagresivnější zkoušení v kavitačním mlýnu je daleko méně destruktivní, než to zjištěné v zařízení pro testování dopadajícího paprsku. Dokonce i v porovnání s mědí, mnohem odolnější nerezová ocel prokazuje daleko větší úbytek materiálu při stejném počtu cyklů. To umožňuje obsáhnout výsledky testování materiálu ve velmi krátkém čase [11].

3.3 Porovnání vlivu dopadajícího vodního paprsku a kavitační eroze

Tři vzorky z mědi a tři vzorky z nerezové oceli byly vystaveny počtu 500, 5000 a 10000 poškozujících cyklů. Jak je možno vidět na Obr. 17, vzorky z mědi vykazují daleko větší poškození, než-li vzorky z nerezové oceli během stejného zatížení povrchu.



Obr. 17 Povrch vzorku mědi a oceli [11] .

Největší deformace se objeví v místě, kde se vodní paprsek dotkne povrchu vzorku a roztrhne se. Poškozená oblast je ostře oddělená od té nepoškozené. Deformace na povrchu materiálu vede k posunu dislokací v materiálu. Při vystavení materiálu většímu počtu cyklů, jako je 5000 a 10000 cyklů dopadu, jsou posuvy zrn u měděného vzorku jasně viditelné. Materiál se však stále nachází v inkubační době a nedochází tudíž k úbytku materiálu. Při počtu 500 cyklů dopadu, ani měděný vzorek, ani vzorek s nerezové oceli, neukazují posun zrn na povrchu. Plastická deformace na povrchu těchto vzorků ukazuje podobné poškození, jako důlky vznikající při zhroucení kavitační bubliny blízko povrchu materiálu. Integrál deformační energie spojený s měřením a počítáním důlku je dán vztahem:

$$E = \vartheta L_m^3 \sum_i \left(1 + \frac{R_i}{l_m}\right)^3 \quad (12)$$

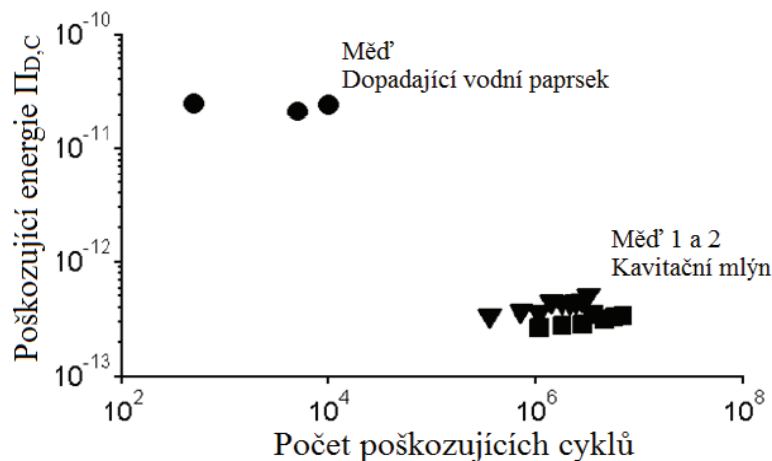
Kde ϑL_m^3 je typická energie materiálu, L_m je druhá typická délka materiálu přidaná k první typické délce materiálu (neboli průměr zrna) l_m a R_i je detekovaný rádius důlku.

Energie totální deformace je dána bezrozměrně, s hustotou vody ρ , délkou ramene $\frac{d}{2}$, specifickou hmotnostní kinetickou energií $\frac{(\frac{d\Omega}{2})^2}{2}$ a počtem poškozujících cyklů fT [11]:

$$\Pi_{D,C} := \frac{64}{fT} \frac{E_{D,C}}{d^5 \rho \Omega^2} \quad (13)$$

Kavitační test

Při použití stejného materiálu byly poškozovány dva vzorky materiálu ve stejném optimálním bodě s mírnou agresivitou kavitace v kavitačním mlýně. V porovnání s dopadajícím vodním paprskem bylo poškození soustředěno v okolí středu vzorku na horním okraji. Intenzita poškození klesá radiálně směrem ven ze vzorku, ale ne tak náhle, jako je tomu při poškození vodním paprskem. Deformační energie se určuje pomocí empirického vztahu (12) spolu s definicí (13) pro bezrozměrné deformační práce za cyklus C . Na následujícím grafu je zobrazena bezrozměrná destruktivní energie jako funkce počtu cyklů pro prvních 9 hodin pro vzorek 1 a 19 hodin pro vzorek 2 v inkubační době. Oba dva vzorky jsou vyrobeny z mědi a byly vystaveny stejným podmínkám testu v kavitačním mlýně. Na grafu je patrný mírný nárůst poškozující energie pro první cykly, což je pravděpodobně dáno únavou povrchu materiálu. Tento proces únavy povrchu nemusí být zachycen při deformaci vodním paprskem vzhledem k velké agresivitě destrukce [11].



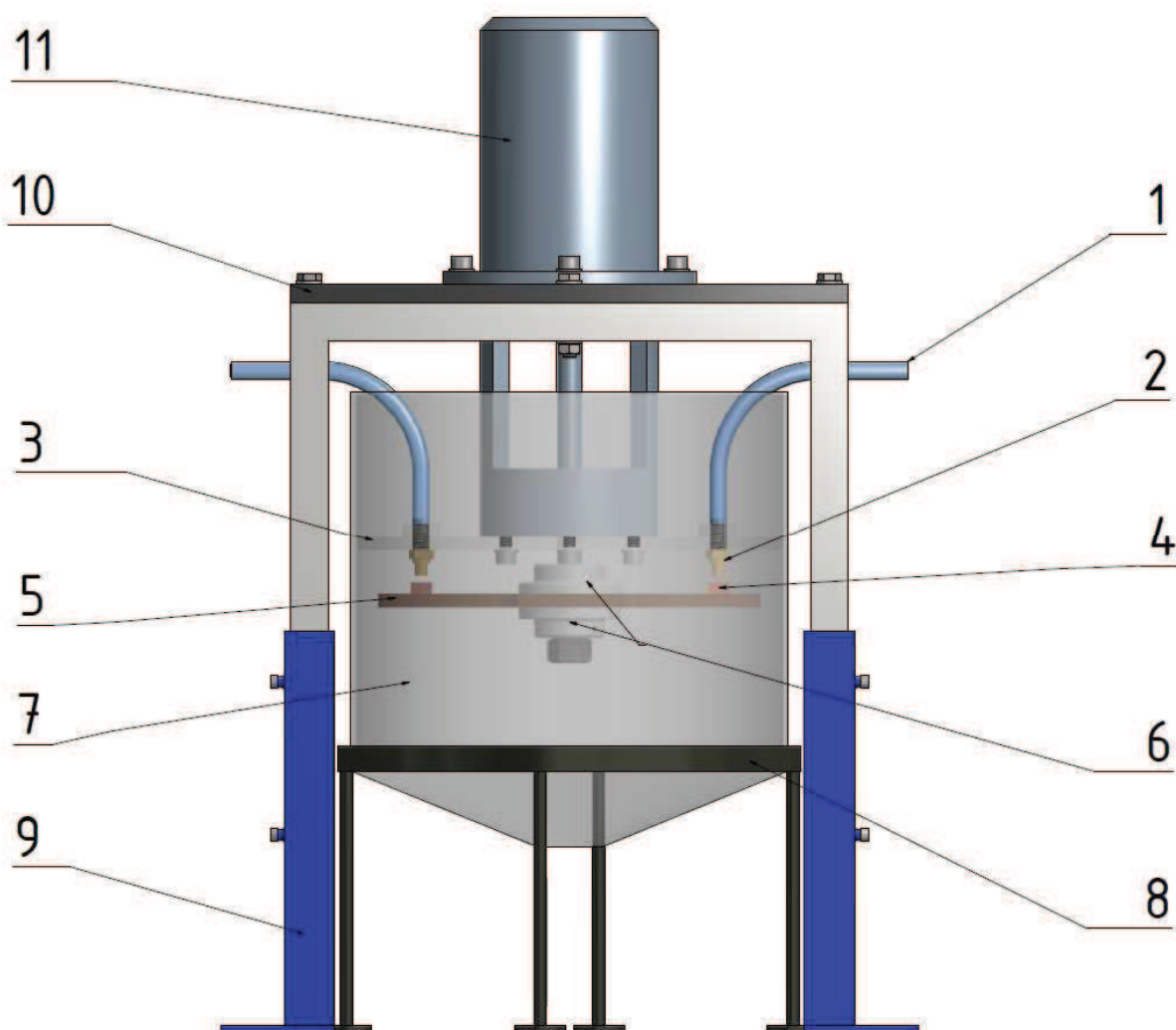
Obr. 18 Poškozující energie kavitačního mlýnu a dopadajícího vodního paprsku [11].

Z porovnání poškození dopadajícím vodním paprskem a poškození kavitací vyplývají dva závěry:

1. Ve skutečnosti bezrozměrná poškozující energie definována pomocí rovnice (13) je pouze lehce závislá na počtu poškozujících cyklů. Tudíž rovnice (13) slouží jako dobré měřítko při analyzování dopadajícího paprsku a kavitace.
2. Poškozující energie vzniklá při dopadu paprsku je o 3 řády větší v porovnání s kavitační erozí [11].

4. Návrh experimentu pro erozi vodním paprskem na rotujícím vzorku

Prvním úkolem při návrhu experimentu pro erozi materiálu vodním paprskem byla konstrukce samotného testovacího zařízení. Toto zařízení bylo navrženo dle následujícího obrázku:



Obr. 19 Návrh zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem.

Hlavní části testovacího zařízení:

1 - Hadička přivádějící vodu k trysce, 2 - Trysky, 3 - Uchycení trysek, 4 - Testovaný vzorek materiálu, 5 - Rotující rameno na uchycení vzorku materiálu, 6 - Příruby pro uchycení rotujícího ramena k hřídeli elektromotoru, 7 - Sběrný válec na vodu, 8 - Podstavec sběrného válce, 9 - Výškově nastavitelný čtyřnohý rám, 10 - Plech přichycující elektromotor k rámu, 11 - Elektromotor.

4.1 Princip a funkce

Do trysek (2) je vháněna voda, při prvním a druhém experimentu, z vodovodního řádu. Voda z trysek dopadá na rotující rameno (5), ke kterému jsou připevněny dva vzorky materiálu (6). Rotující rameno (5) je poháněno elektromotorem (11). Voda je rozprášena do sběrného válce (7) a odchází trychtýřovitým otvorem ve spodní části tohoto válce. Následně je odváděna odpadním potrubím do dolní nádrže. Sběrný válec (7) je volně uložen na podstavci (8). Výškově nastavitelný čtyřnohý rám (9) je pevně přichycen k podlaze.

5. Realizace experimentu a jeho vyhodnocení

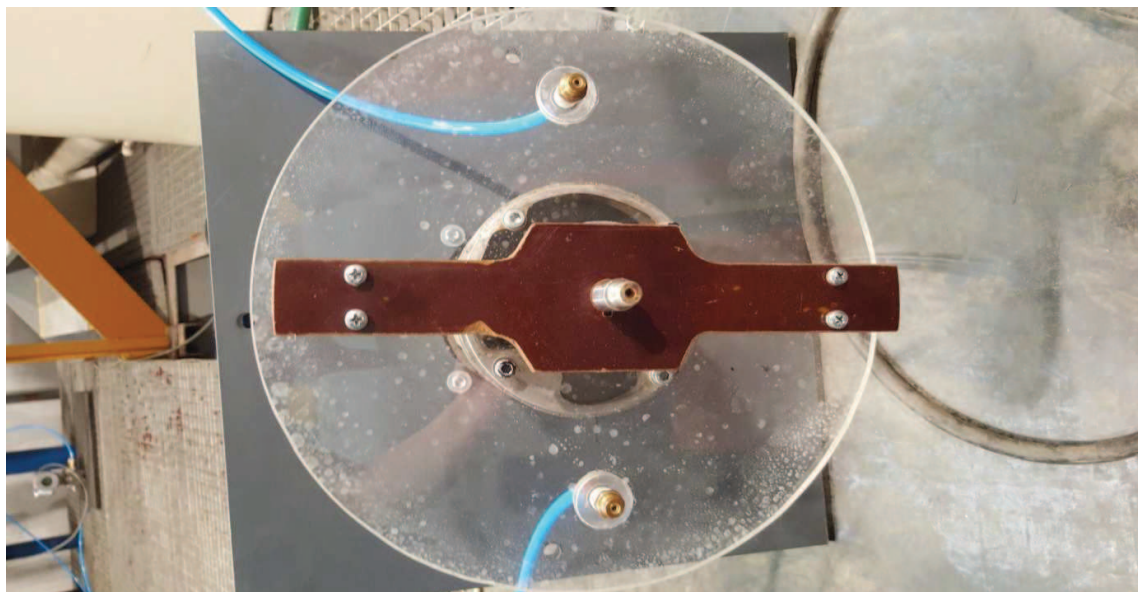
Experiment byl prováděn v laboratoři oboru Fluidního inženýrství ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství, který zprostředkoval úpravu vzorku materiálu před experimentem a následné vyhodnocení vzorku materiálu po experimentu. V laboratoři Fluidního inženýrství byl prováděn přímo experiment dopadu vodního paprsku na materiál. Experiment na tomto zařízení byl proveden pro několik nastavení hydraulického okruhu. V prvním nastavení hydraulického okruhu byla doba experimentu 8 hodin a tlak vody v okruhu byl odpovídající tlaku vody ve vodovodním řádu, odkud byla brána voda. Druhé nastavení bylo naprosto totožné s tím, že doba experimentu byla 16 hodin. Ve třetím nastavení byl změněn hydraulický okruh tak, že voda v okruhu byla hnána z nádrže 15-ti člankovým čerpadlem a pak se opět do nádrže vracela. Tlak vody v okruhu při tomto provedení byl 1,5 MPa, doba trvání experimentu byla 8 hodin a 16 hodin. Touto sadou experimentů se testoval dopadající paprsek na rotující rameno. Po dalším uvážení bylo rozhodnuto provést další sadu experimentů, kdy paprsek dopadá přímo na vzorek materiálu, který je pevně uchycen. Pro tuto konfiguraci byl tlak vody v okruhu zvýšen na 2,5 MPa. Vzorek materiálu byl umístěn ve vzdálenosti 10 mm a 100 mm od trysky. Posledním experimentem bylo zanoření vzorku materiálu ve vzdálenosti 10 mm od trysky pod vodu.

5.1 Testovací zařízení na erozi materiálu vodním paprskem

Na Obr. 20 už je možno vidět skutečnou realizaci testovacího zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem. Jako v návrhu modelu pro tento experiment voda proudila na vzorky přes trysky o průměru $d = 2,7$ mm. Tyto trysky byly uchyceny v plexiskle, které bylo přímo přichyceno k elektromotoru EMP. Na hřídel elektromotoru bylo namontováno rotující rameno se dvěma vzorky (Obr. 21). Voda odražená od vzorků se zachytávala ve sběrném válci, odkud přes odpadní potrubí proudila do dolní nádrže. Celá tato konstrukce byla pevně přišroubována k výškově nastavitelnému rámu. Tento rám byl následně uchycen přes desku k podlaze.



Obr. 20 Testovací zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem.



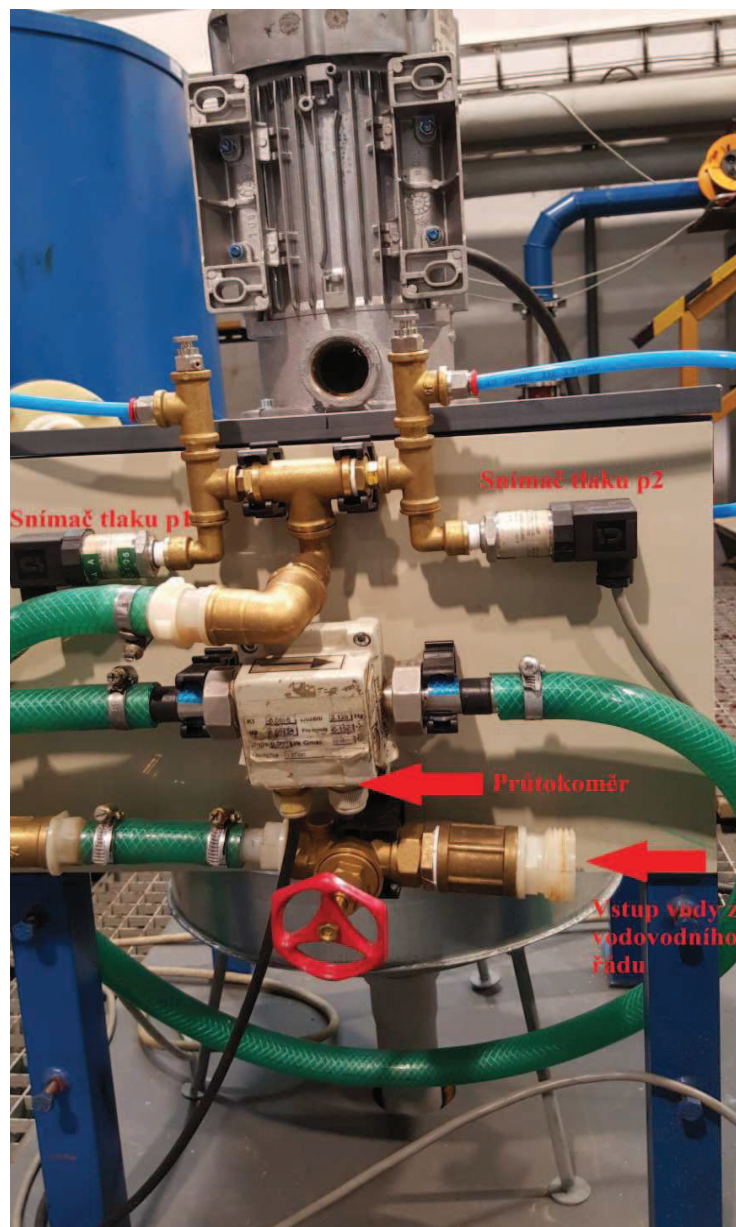
Obr. 21 Uchycení trysek v plexiskle a rotujícího ramena připevněného na hřídel elektromotoru.

5.2 Testování eroze materiálu pro tlak vody v okruhu $p = 435 \text{ kPa}$

Pro první a druhé testování materiálu bylo rozhodnuto, že se voda bude přímo odebírat z vodovodního řádu. Tím pádem tlak vody v celém obvodu byl přibližně $p = 435 \text{ kPa}$. Měrný průtok přes obě trysky byl $Q = 0,270 \text{ l/s}$. Při této konfiguraci byla dopadová rychlost vodního paprsku $v = 24,4 \text{ m/s}$. Podle vztahu (3), při uvažování numerické konstanty $k = 2$ a rychlosti zvuku v kapalině $v_s = 1480 \text{ m/s}$, byla pak rychlost šíření tlakové vlny $c = 1528,8 \text{ m/s}$. Impaktní tlak tedy podle vztahu (2) byl roven $p_i = 37,2 \text{ MPa}$, při uvažování hustoty vody $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$. Otáčky elektromotoru, tím pádem i rotujícího ramene, byly $n = 3480 \text{ ot/min}$. K elektromotoru byl připojen frekvenční měnič.



Obr. 22 Testovací zařízení při provozu.

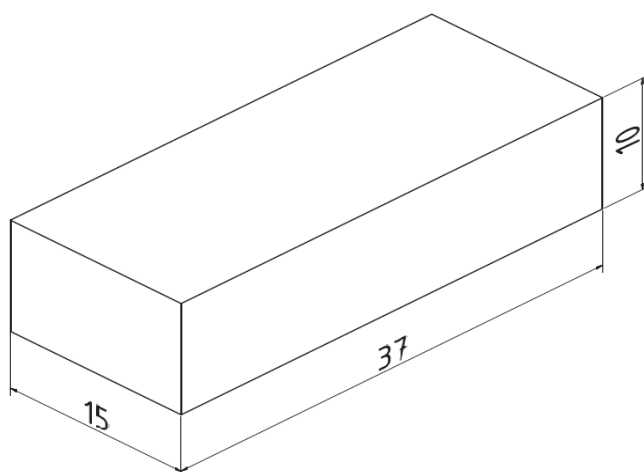


Obr. 23 Zapojení okruhu.

Na Obr. 22 je možno vidět průběh testování vzorku při provozu. Obr. 23 nám ukazuje zapojení hydraulického okruhu. Voda se přivádí z vodovodního řádu přes kulový ventil. Následně prochází průtokoměrem, odkud proudí do rozvětvení, kde se měří tlak v obvodu p_1 a p_2 . Odtud pak přes modré hadičky proudí do trysek.

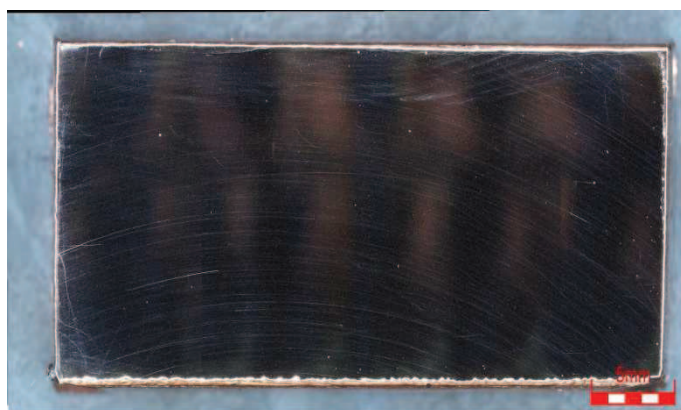
5.2.1 Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 435\text{kPa}$ a dobu trvání experimentu 8 hodin

Pro experiment byl použit vzorek o rozměrech podle Obr. 24. Tohoto vzorku byly vyrobeny dva kusy, na každou část rotujícího ramene byl připevněn jeden vzorek.

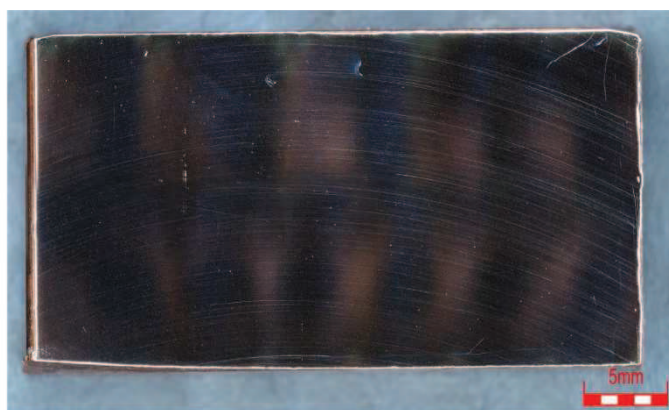


Obr. 24 Rozměry vzorku pro experiment na erozi materiálu vodním paprskem

Materiálem těchto vzorků byla měď. Vzorky byly prvně obroušeny na automatické brusce Tegramin 30 a následně byly leštěny diamantovou pastou o velikosti částic $1\mu\text{m}$ (Obr. 25 a) vzorek 1, b) vzorek 2).



a) Vzorek 1



b) Vzorek 2

Obr. 25 a) Vzorek 1 po vyleštění, b) Vzorek 2 po vyleštění

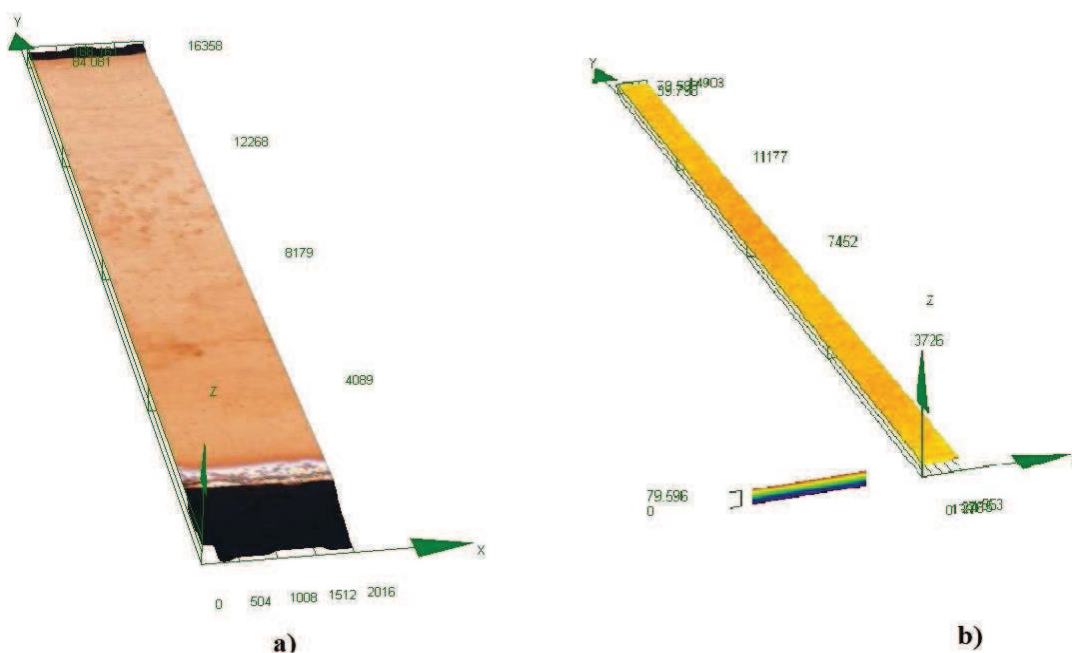
Po prvním experimentu trvajícím 8 hodin byly vzorky vyjmuty a zváženy. Při tomto zvážení nebyl zjištěn žádný úbytek materiálu. Následně byly vzorky předány na Ústav

materiálových věd a inženýrství. Zde byly vzorky nasnímány a vyhodnoceny pomocí 3D optodigitálního mikroskopu Olympus DSX 510. Vyhodnocení vzorků spočívalo ve dvou krocích, a to prvně neočištěných vzorků a následně očištěných vzorků pomocí etanolu. U obou vzorků byly zjištěny prakticky stejné výsledky, proto bude dál interpretován výsledek pro vzorek 1. Nasnímaný vzorek 1 před očištěním je na Obr. 26.



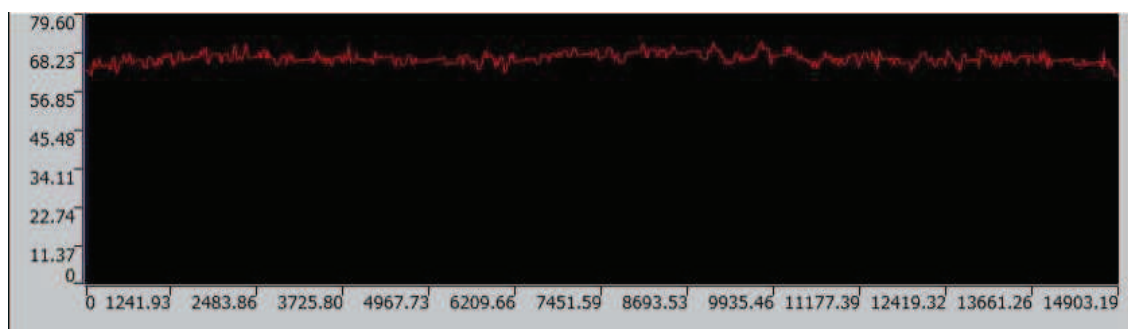
Obr. 26 Vzorek po 8hodinovém experimentu, nasnímán před čištěním

Jak je možno vidět, na vzorku nejsou viditelné prakticky žádné stopy erozivního poškození. Jsou zde vidět pouze nečistoty v některých místech vzorku. V jednom místě vzorku se analyzoval tenký pruh, který byl nasnímán v 3D módu, čímž se naskenoval i hloubkový profil vzorku Obr 27 a). Vzorek nebyl úplně rovný, proto jsou na okrajích vidět černé pásy, které značí zaoblení vzorku. Na tento pás se následně použije větší zvětšení (500x). Toto zvětšení se použije na menší plochu. Pás je pak tenčí a delší. Obr. 27 b).



Obr. 27 a) Vyjmutý pruh ze vzorku, kde byl prováděn 3D scan b) 500x zvětšená plocha na tomto pásu.

Červená místa na Obr. 27 b) značí nejvyšší místa profilu a fialovou barvou je značeno nejnižší místo. Jak je vidět, rozdíly v hloubce jsou naprosto minimální. To znamená, že účinek vodního paprsku při daných podmínkách neměl na vzorek žádný vliv. Pro lepší ilustraci struktury povrchu vzorku byl při tomto zvětšení vybrán pás, kde byl proveden histogram Obr. 28. Na histogramu je vidět, že rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším místem je zhruba 8 μm , což odpovídá hladkému povrchu.

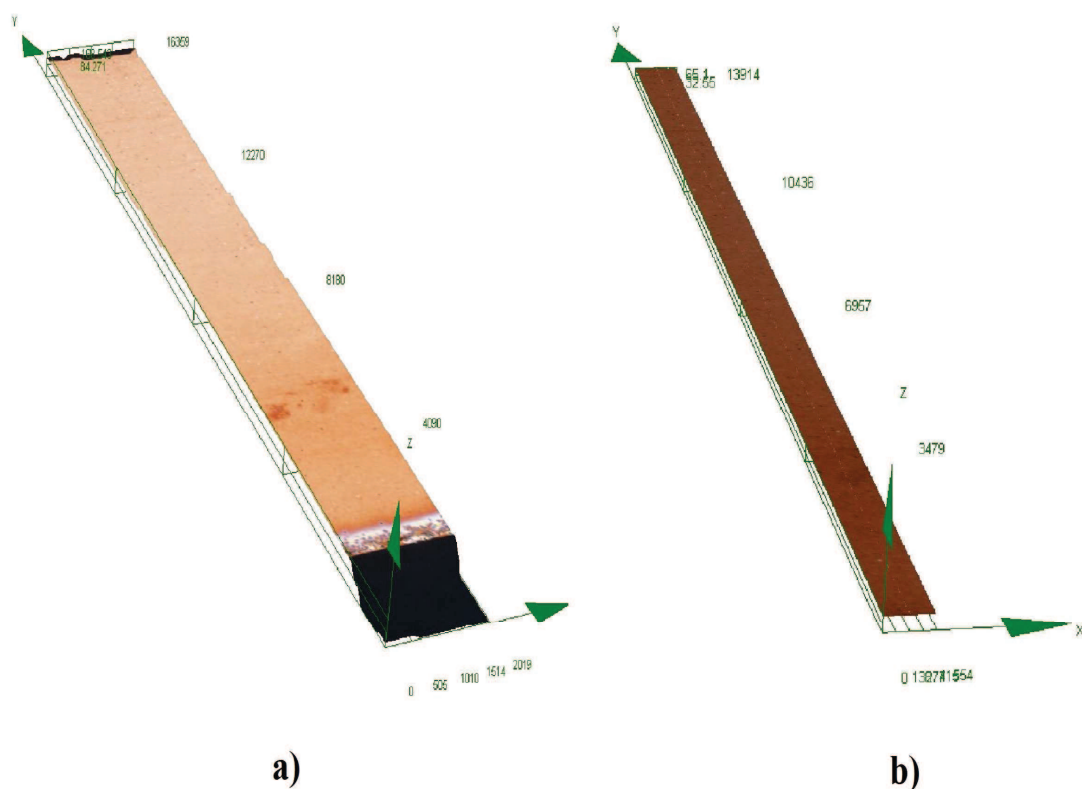


Obr. 28 Histogram povrchu materiálu vzorku před očištěním

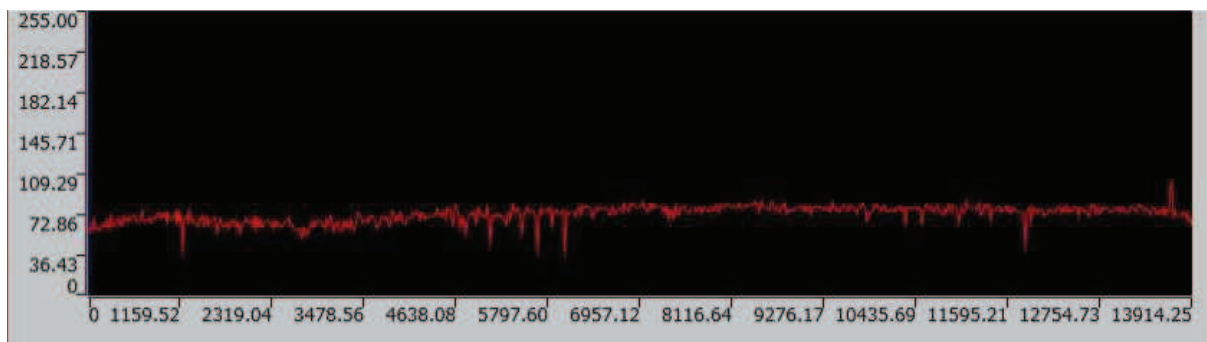
Následně byl vzorek očištěn v etanolu Obr. 29 a byla opět provedena stejná procedura vyhodnocení vzorku. Ani při výběru pruhu povrchu a jeho následné 3D topografii profilu zde nejsou patrné žádné viditelné poškozující účinky vodního paprsku na materiál vzorku Obr. 30 a) b).



Obr. 29 Vzorek 1 po očištění etanolem



Obr. 30 Provedení pro vyčištěný vzorek a) Vyjmutý pruh ze vzorku, kde byl prováděn 3D scan b) 500x zvětšená plocha na tomto pásu.



Obr. 31 Histogram povrchu vzorku materiálu po vyčištění

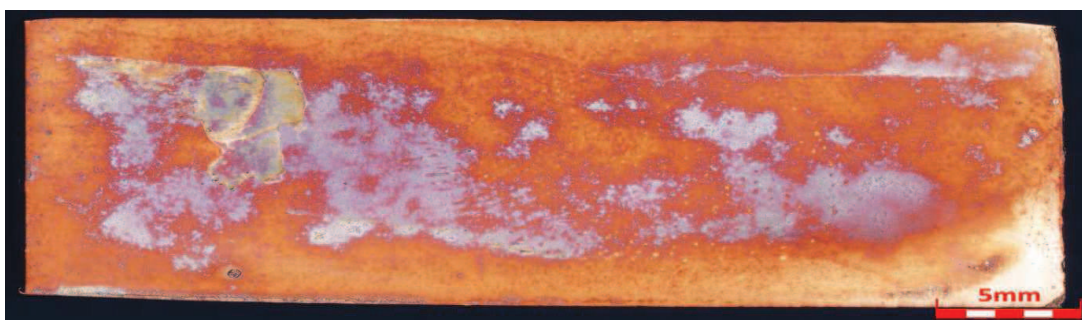
I na následně provedeném histogramu vzorku materiálu po vyčištění (Obr. 31) není viditelné nějaké znatelné porušení povrchu vzorku materiálu.

5.2.2 Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 435\text{kPa}$ a dobu trvání experimentu 16 hodin

Z důvodu nulového úbytku materiálu bylo rozhodnuto, že další variantou experimentu bude navýšení počtu dopadových cyklů. K tomuto experimentu byly použity vzorky materiálu z předchozího experimentu. Tím pádem materiálem vzorků byla opět měď a jejich rozměry zůstaly stejné podle Obr. 24. Vzorky materiálu byly vystaveny dopadovým cyklům po dalších 8 hodin, takže celkový čas experimentu byl 16 hodin. Na vzorcích už nebyla prováděna žádná úprava povrchu.



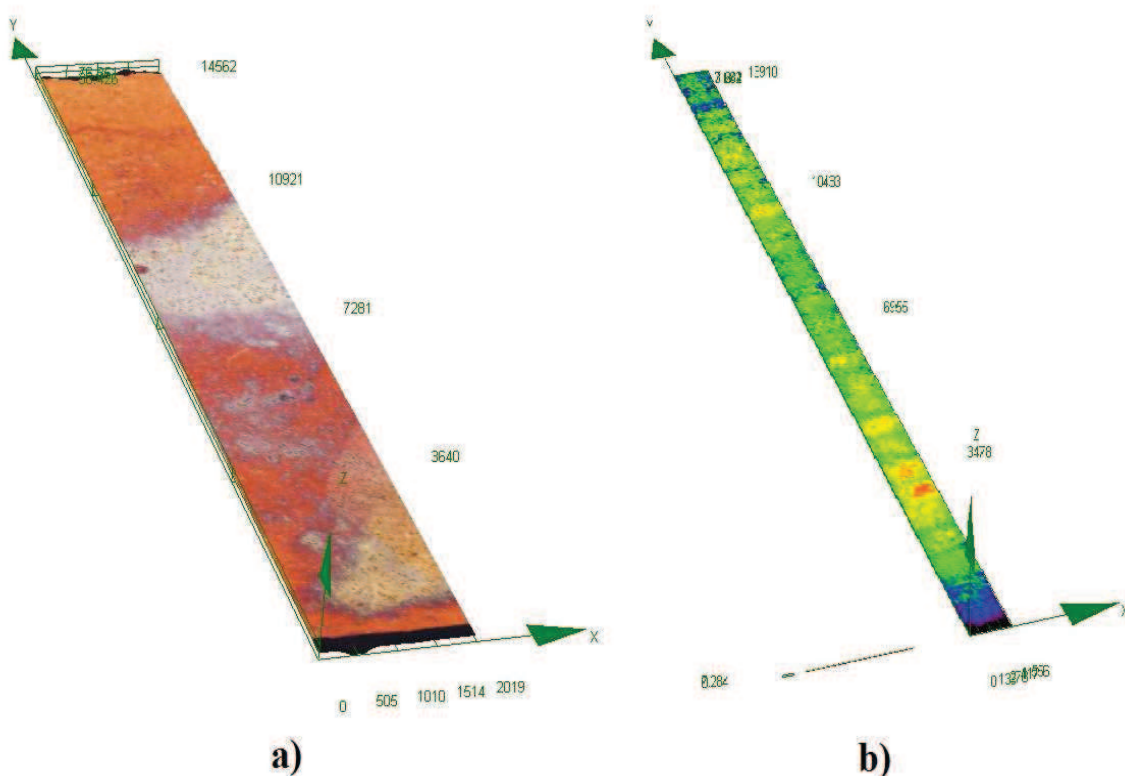
a)



b)

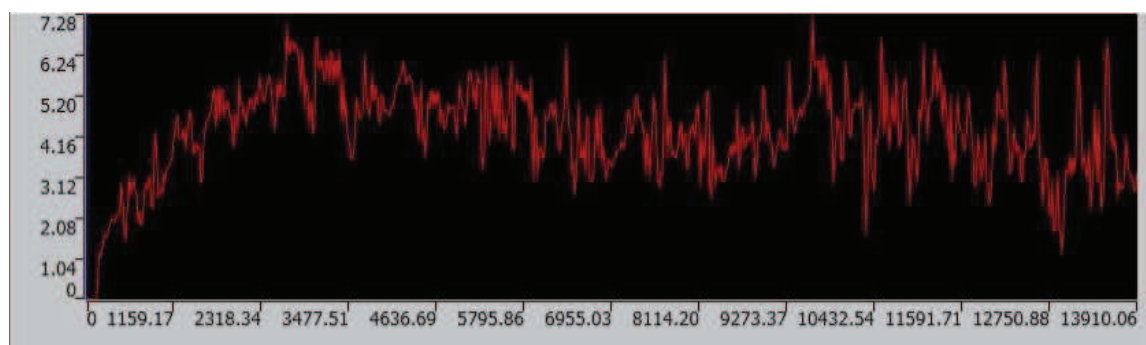
Obr. 32 a) Vzorek 1a b) vzorek 2 po 16-ti hodinovém experimentu.

Vzorek byl opět zvážen a byl zjištěn nulový úbytek materiálu, naopak se jeho hmotnost lehce zvýšila. Obr. 32 ukazuje a) vzorek 1 a b) vzorek 2 po 16-ti hodinovém experimentu, před vyčištěním. Na obrázku jsou patrné velké stříbrné skvrny, které by měly být způsobené nejspíše oxidací vzorku materiálu. Tento jev měl za následek lehké zvýšení hmotnosti vzorku materiálu. Z důvodu, že tyto skvrny nešly nijak jinak odstranit než mechanicky, což by mělo za následek poškození povrchu vzorku materiálu, bylo vyhodnocování pomocí 3D optomikroskopu Olympus DSX 510 prováděno pouze na vzorku materiálu bez očištění. Při vyhodnocování se postupovalo stejným způsobem jako u 8 hodinového experimentu.



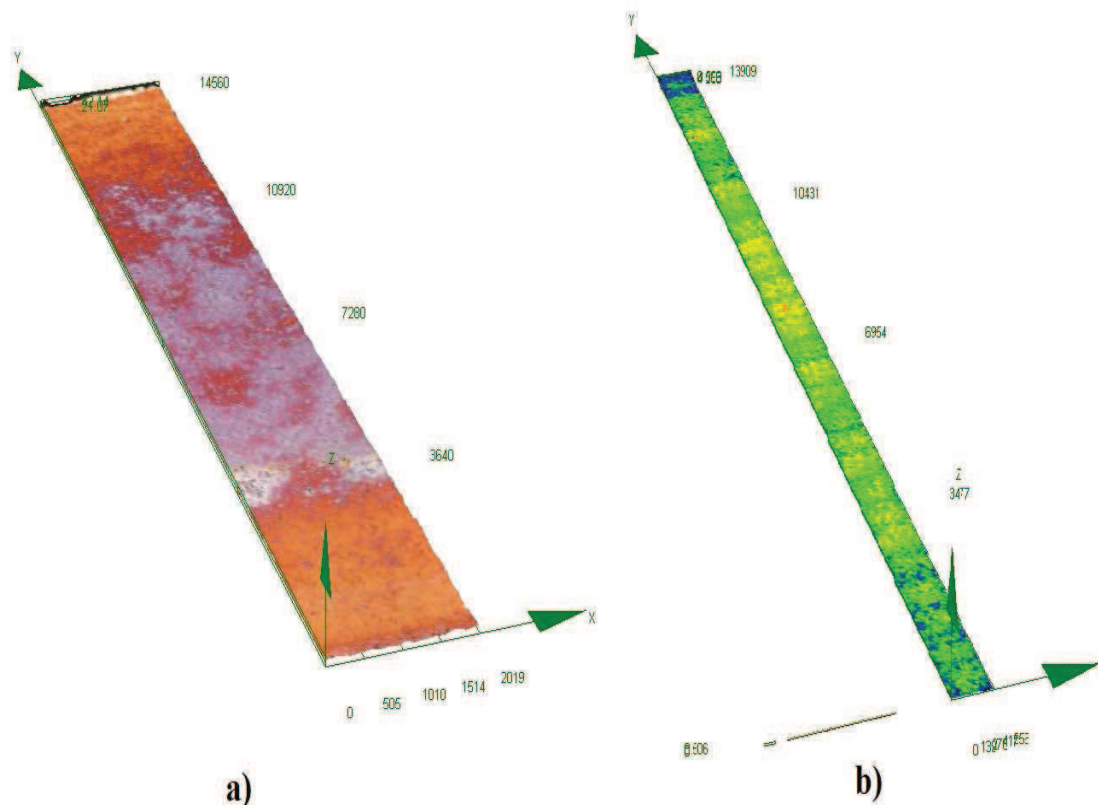
Obr. 33 a) Vyjmutý pruh ze vzorku, kde byl prováděn 3D scan b) 500x zvětšená plocha na tomto pásu pro vzorek 1.

Obr. 33 ukazuje 3D scan pruhu materiálu (a) a 500x zvětšenou část jeho plochy (b). Jak je vidět, žádný úbytek materiálu nevznikl, pouze se zhoršila drsnost povrchu vzorku materiálu z důvodu jeho oxidace. Na tomto pruhu byl vytvořen pás, kde se provedl histogram vzorku Obr. 33. Může se zdát, že histogram ukazuje veliké výkyvy mezi nejnižším a nejvyšším místem, ale to je dáno měřítkem na ose z, které bylo posunuto od 0 do 7,28 μm . To znamená shodný výsledek, jako tomu bylo u experimentu po dobu 8 hodin.

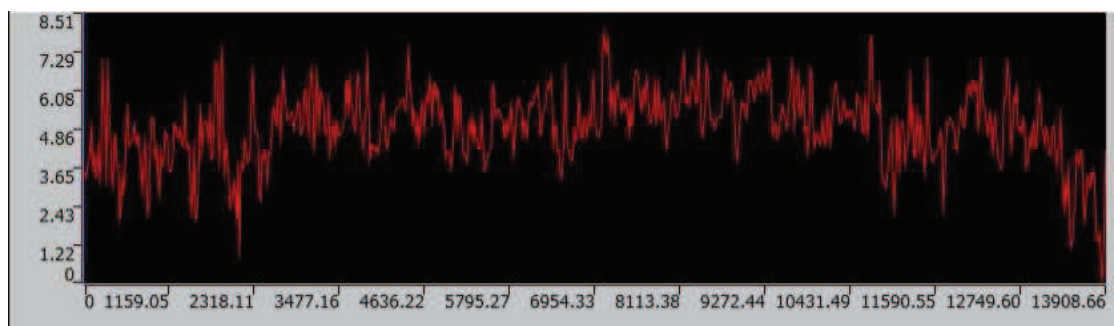


Obr. 34 Histogram vzorku materiálu 1 při 16 hodinovém experimentu

Vyhodnocení vzorku materiálu 2 mělo prakticky totožný průběh. Na provedeném 3D scanu povrchu materiálu, ani při jeho 500x zvětšení, není znatelné žádné poškození materiálu, kromě nánosu nečistot, vzniklých při oxidaci vzorku materiálu (Obr. 35 a) b)). Následně provedený histogram to pouze potvrzuje (Obr. 36)



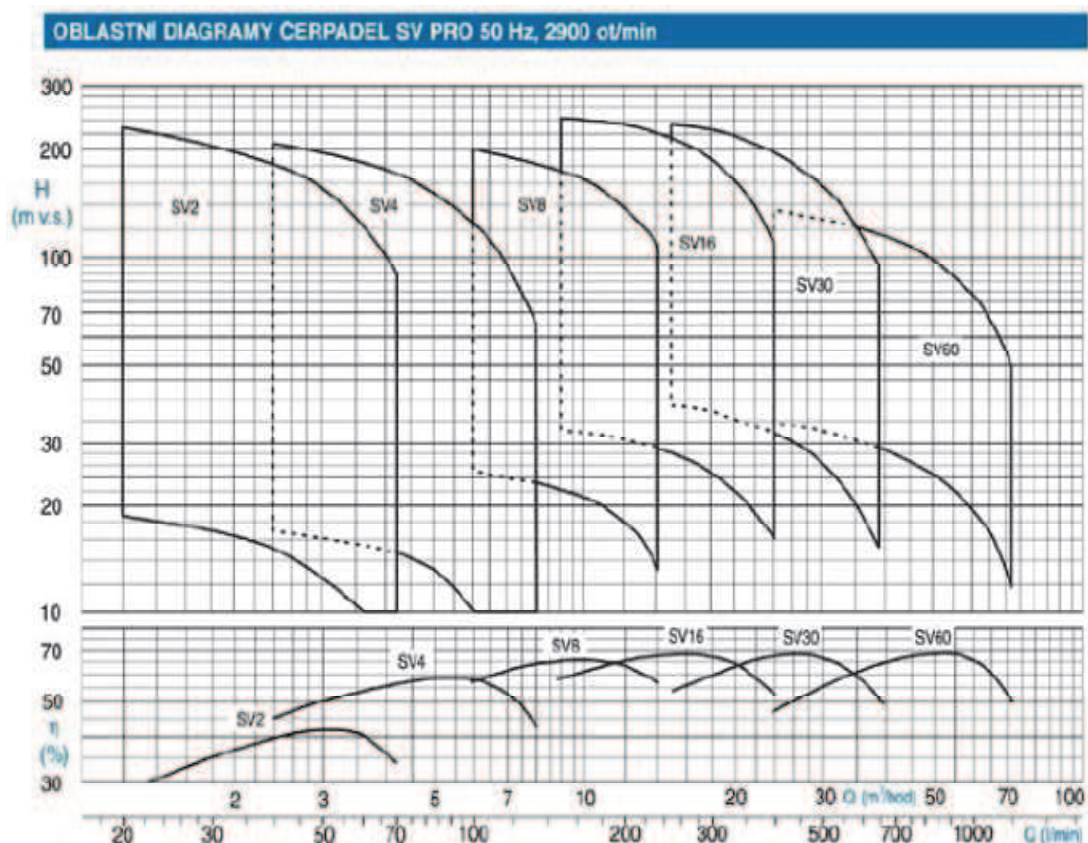
Obr. 35 a) Vyjmutý pruh ze vzorku, kde byl prováděn 3D scan b) 500x zvětšená plocha na tomto pásu pro vzorek 2.



Obr. 36 Histogram vzorku materiálu 2 při 16 hodinovém experimentu

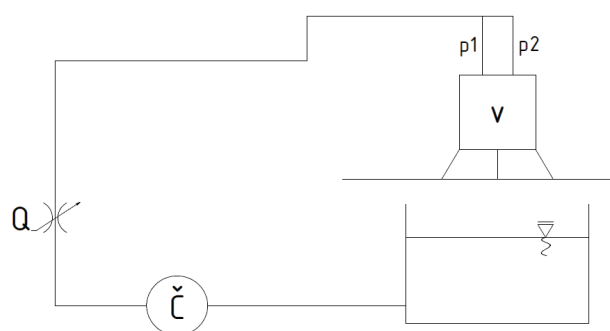
5.3 Testování eroze materiálu pro tlak vody v obvodu $p = 1,5 \text{ MPa}$

Z důvodu nulové eroze materiálu vzorku při testování po dobu 8 a 16 hodin bylo rozhodnuto pro zvýšení tlaku v obvodu, což má za následek velké zvýšení dopadové rychlosti a tím i impaktního tlaku. Pro docílení vyššího tlaku v obvodu bylo vybráno 15-ti článkové čerpadlo SV 1615 F150T (charakteristika čerpadla Obr. 37).



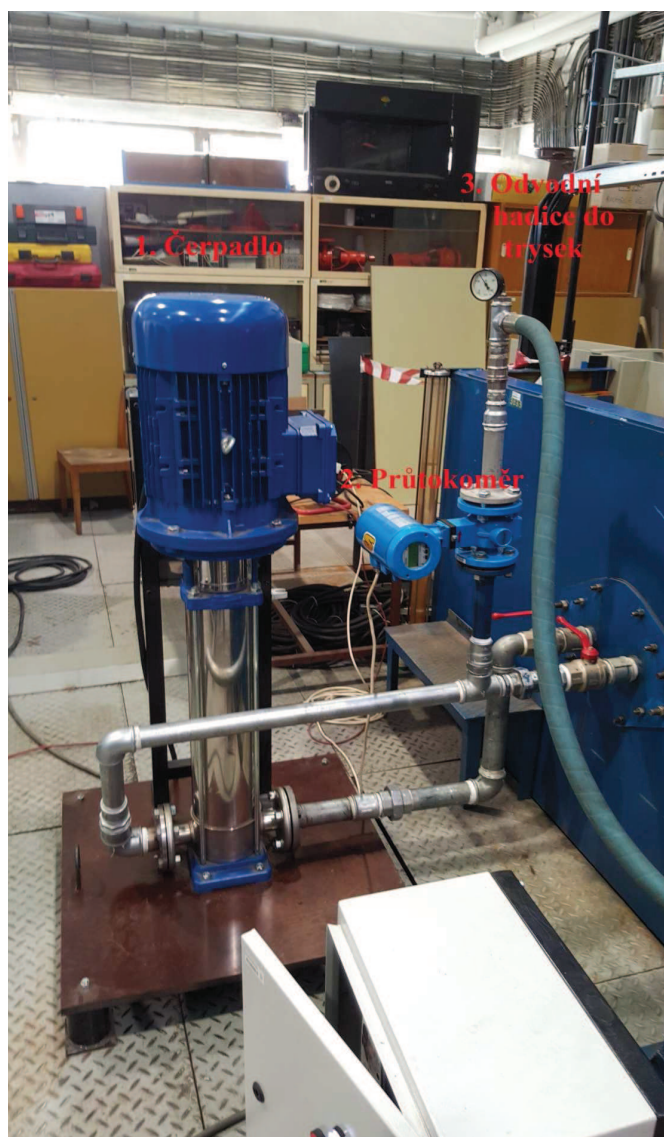
Obr. 37 Charakteristika čerpadla SV 1615 F150T [14]

Z důvodů instalace čerpadla do okruhu bylo nutností celé zařízení přesunout. Okruh se změnil tak, že voda byla odebírána čerpadlem z nádrže. Následně voda procházela přes průtokoměr do trysek. Před jejich vstupem se měřil tlak p_1 a p_2 . Z trysek voda dopadala na vzorky materiálů a následně otvorem ve spodní části zařízení odcházela přes odpadní potrubí do nádrže, odkud byla čerpána zpět do okruhu Obr. 38.



Obr. 38 Schéma měřicí tratě.

Na Obr. 39 je možno vidět zapojení čerpadla k nádrži s vodou. Voda je odebírána čerpadlem 1, následně přes průtokoměr 2 odchází odvodní hadicí 3 do trysek.



Obr. 39 Připojení čerpadla k nádrži z vodou

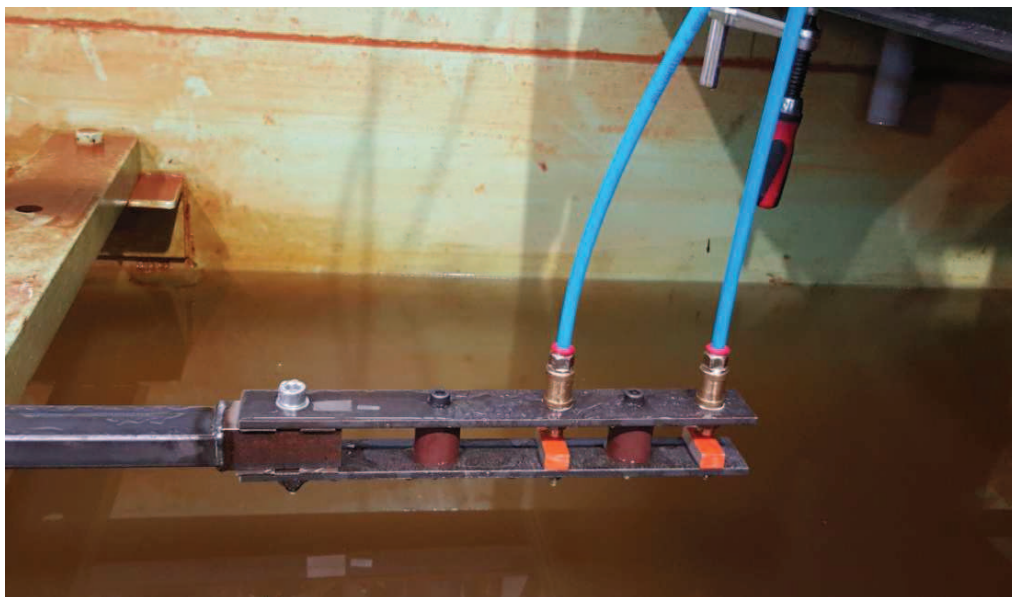
Při tomto nastavení experimentu byl průtok oběma tryskami roven $Q = 0,54$ l/s, tlak v obvodu $p_1 = 1497$ kPa a tlak $p_2 = 1495$ kPa. Tím pádem dopadová rychlost za těchto podmínek byla přibližně $v = 47,16$ m/s. Opět se použilo stejných předpokladů jako v předchozí části experimentu a to, že podle vztahu (3) při uvažování numerické konstanty $k = 2$ a rychlosti zvuku v kapalině $v_s = 1480$ m/s, byla rychlost šíření tlakové vlny v kapalině přibližně rovna $c = 1574,32$ m/s. Z toho vyplývá, že impaktní tlak při dopadu kapaliny na materiál podle vztahu (2) byl roven $p_i = 73,4$ MPa, když uvažujeme hustotu vody $\rho = 998$ kg/m³ při teplotě vody $t = 20$ °C. Otáčky elektromotoru byly z důvodu bezpečnosti sníženy na $n = 2986$ min⁻¹, což byly i otáčky rotujícího ramene.

5.3.1. Vyhodnocení experimentu pro tlak vody v okruhu $p = 1,5$ MPa a dobu trvání experimentu 8 hodin a 16 hodin

Vzorek byl vystaven impaktnímu tlaku $p_i = 73,4$ MPa po dobu 8 hodin. To znamená, že počet dopadových cyklů byl vyšší než 1,4 milionů. Avšak ani při těchto podmínkách nebylo docíleno žádné eroze materiálu. Nebylo pozorovatelné ani žádné vizuální poškození. Toto zjištění vedlo k prodloužení doby experimentu na 16 hodin, při počtu dopadových cyklů přes 2,8 milionu. I přes skoro dvojnásobné překročení počtu dopadových cyklů, jak tomu bylo v případě článku [11], nebylo docíleno poškození u vzorku mědi. Opět také bez vizuálního poškození. Z těchto důvodů nebyl vzorek materiálu dále analyzován Ústavem materiálůvých věd a inženýrství, jako tomu bylo v prvním a druhém případě testování vzorku materiálu při tlaku vody v okruhu $p = 435$ kPa a době trvání experimentu 8 a 16 hodin.

5.4 Testování eroze materiálu pro tlak vody v okruhu $p = 2,5$ MPa, dopad přímého nepřerušovaného vodního paprsku a použití trysek o průměru 1,5 mm

Z důvodu absence pozorovatelných účinků dopadajícího vodního paprsku na rotující rameno bylo rozhodnuto zkusit experiment, kdy vzorek bude pevně uchycen v přípravku a nebude se pohybovat Obr. 40. Novým parametrem experimentu byl vzorek materiálu. Měděný vzorek materiálu byl nahrazen hliníkovým, o stejných rozměrech jako původní (Obr.24). Vzorek materiálu byl nabarven, proto je na jeho horní straně patrná oranžová barva. Dalším novým parametrem byly trysky. Původní trysky o průměru $d = 2,7$ mm byly vyměněny za nové o průměru $d = 1,5$ mm. Tyto nové trysky byly vyrobeny v laboratoři oboru Fluidního inženýrství. Doba experimentu byla jako v předchozích případech 8 hodin.



Obr. 40 nastavení experimentu pro dopad přímého paprsku

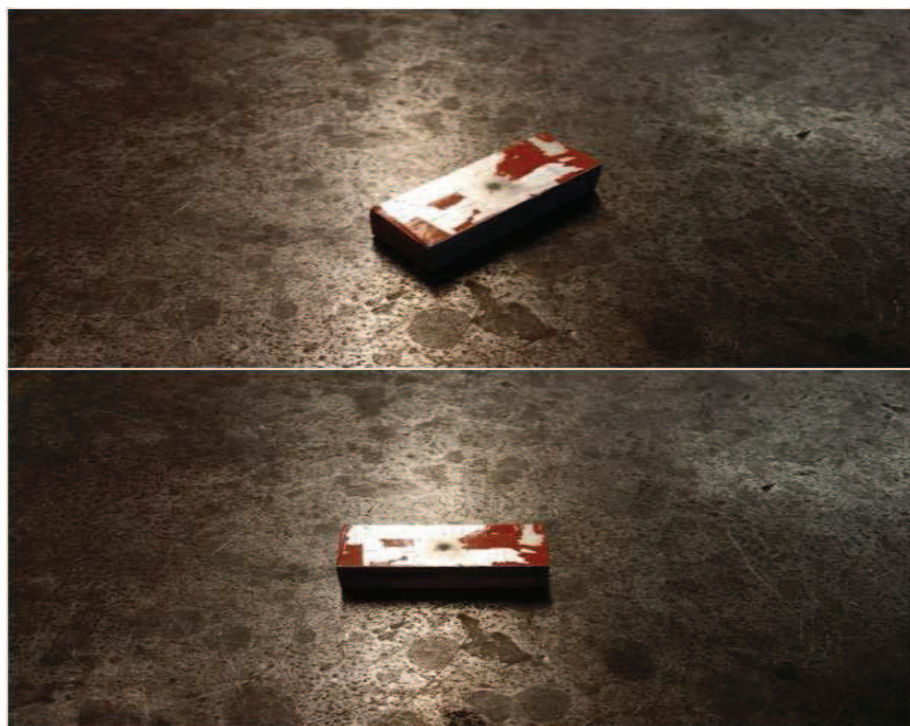
Průtok při této konfiguraci obvodu byl $Q = 0,19$ l/s a tlak v hydraulickém okruhu byl $p = 2,5$ MPa. Dopadová rychlost při těchto parametrech byla tedy $v = 53,76$ m/s. Pro toto nastavení experimentu byly uvažovány stejné předpoklady jako v předchozích případech. Podle vztahu (3) při uvažování numerické konstanty $k = 2$ a rychlosti zvuku v kapalině $v_s = 1480$ m/s, byla rychlost šíření tlakové vlny v kapalině přibližně rovna $c = 1587,5$ m/s. Z toho vyplývá, že podle vzorce pro impaktní tlak (2) je jeho hodnota $p_i = 85,2$ MPa. Tyto hodnoty byly vypočítány při uvažování teploty vody $t = 20$ °C a její hustotě $\rho = 998$ kg/m³. Pro tyto hodnoty byly vyzkoušeny celkem čtyři experimenty. Hladký vzorek materiálu, vzdálenost trysky od vzorku 10 mm a 100 mm a zdrsňený vzorek materiálu, vzdálenost trysky od vzorku také 10 mm a 100 mm. Ve všech případech byla doba experimentu 8 hodin.

5.4.1 Vyhodnocení experimentu pro hladký vzorek materiálu a vzdálenosti od trysky 10 mm

Vzorek materiálu byl uchycen v přípravku ve vzdálenosti 10 mm od trysky, kde na něj dopadala voda Obr. 41. V této vzdálenosti po 8 hodinovém experimentu nebyl zjištěn žádný hmotnostní úbytek, ale bylo zjištěno vizuální poškození materiálu Obr. 42. Z toho zatím vyplývá, že menší průměr trysky a větší vzdálenost od vzorku než původních 6 mm, má na jeho poškození vliv.



Obr. 41 Vzorek materiálu při experimentu



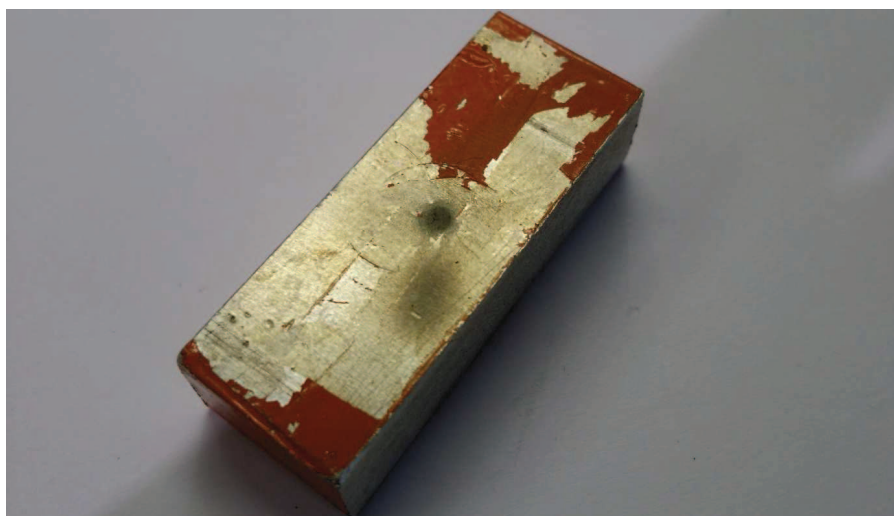
Obr. 42 Hladký vzorek po 8 hodinovém experimentu při vzdálenosti od trysky 10mm

5.4.2 Vyhodnocení experimentu pro hladký vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 100 mm

Na tento experiment byl použit nový přípravek pro uchycení vzorku materiálu a trysek. Jeho provedení je možno vidět na Obr. 43.



Obr. 43 Uchycení vzorku materiálu a trysek v přípravku

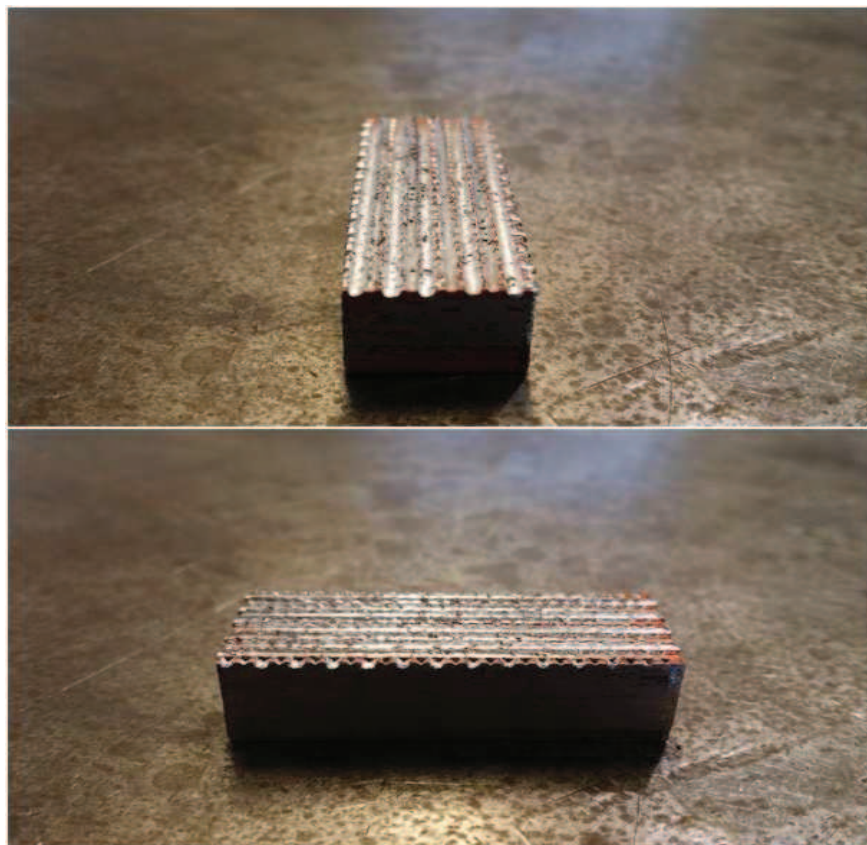


Obr. 44 Hladký vzorek po 8 hodinovém experimentu a vzdálenosti od trysek 100 mm

Na vzorku bylo opět patrné vizuální poškození Obr. 44, stejně jako v případě vzdálenosti vzorku od trysek 10 mm. V tomto případě však byl poprvé změřen hmotnostní úbytek materiálu. Původní hmotnost vzorku byla 15,57 g a po dokončení experimentu 15,56g. To znamená, že hmotnostní úbytek materiálu byl velice malý, pouze 0,06 %. I když je tento úbytek malý, lze předpokládat, že vzdálenost vzorku materiálu od trysek má na tento jev vliv. Je to nejspíš dáno tím, že se kontinuální paprsek rozpadne více do formy kapiček a dochází tak i k erozi materiálu dopadajícími vodními kapkami.

5.4.3 Vyhodnocení experimentu pro drsný vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 10 mm

Pro další fázi experimentu byl použit vzorek, jehož povrch byl zdrsňen Obr. 45.

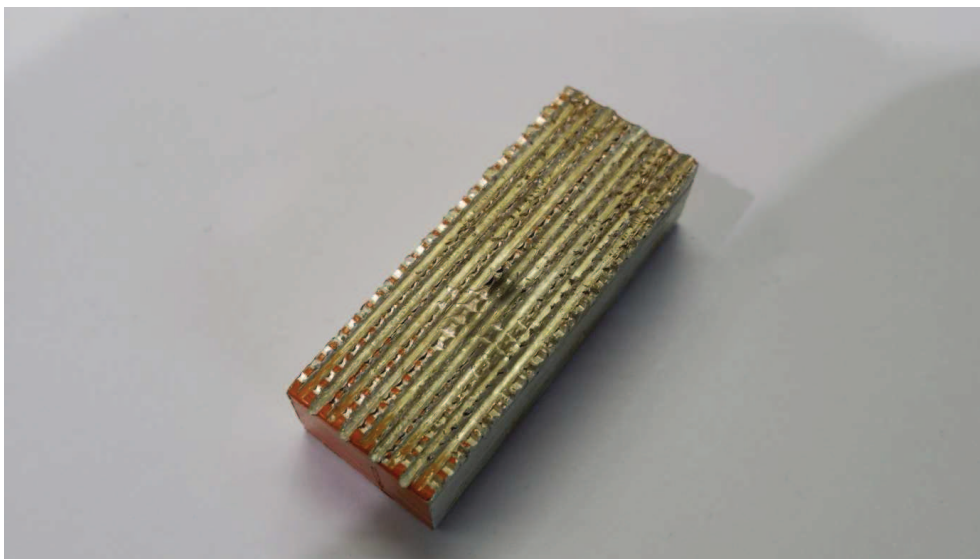


Obr.45 Povrch drsné vzorku materiálu před experimentem

Při použití stejných parametrů, jako v případě hladkého vzorku, nebyl ve vzdálenosti 10 mm vzorku materiálu od trysky změřen žádný hmotnostní úbytek materiálu. Nebylo však pozorováno ani žádné vizuální poškození.

5.4.4 Vyhodnocení experimentu pro drsný vzorek materiálu a vzdálenosti od trysek 100 mm

Opět byly použity stejné parametry jako pro hladký vzorek materiálu. Při vzdálenosti vzorku materiálu od trysek 100 mm nebyl zjištěn žádný hmotnostní úbytek materiálu. Bylo však pozorovatelné vizuální poškození Obr. 46. Je tedy zřejmé, že větší vzdálenost vzorku materiálu od trysek má na jeho poškození větší vliv, než vzdálenost malá. Z toho plyne, jako v případě hladkého vzorku a vzdálenosti 100 mm, že je rozpad souvislého paprsku na kapičky lepší pro poškození materiálu.



Obr. 46 Drsný vzorek po 8 hodinovém experimentu a vzdálenosti od trysek 100 mm

5.5 Vzorek materiálu umístěn pod hladinou ve vzdálenosti 10 mm

Posledním experimentem bylo zanoření přípravku, stejně jako je tomu v případě Obr. 41, pod vodu. Předpokládá se totiž, že při rychlostech kapaliny na výstupu z trysky $v = 53,76$ m/s, by mohlo v místě uchycení vzorku materiálu dojít ke kavitaci. Tím by mohlo dojít ke kavitační erozi a hmotnostnímu úbytku na vzorku materiálu. Obr. 47 ukazuje zanořený přípravek pod hladinou v průběhu experimentu. Experiment byl prováděn po dobu 8 hodin, a to pro oba typy vzorků: hladký i drsný.



Obr. 47 Zanoření přípravku se vzorkem materiálu a tryskou pod hladinu v průběhu experimentu

5.5.1 Vyhodnocení hladkého vzorku materiálu umístěného ve vzdálenosti 10 mm pod hladinou

Po 8 hodinovém experimentu byl zjištěn úbytek materiálu u hladkého vzorku, a to 0,01 g. Nejen, že bylo docíleno úbytku materiálu, ale i po vizuální stránce jsou vidět stopy kavitační eroze Obr. 48. Z těchto důvodů byl materiál dále poskytnut Ústavu materiálových věd a inženýrství k podrobnější analýze. Byl proveden obdobný postup vyhodnocení vzorku materiálu jako v případě 5.2.1 a 5.2.2. Vzorky byly nasnímány a vyhodnoceny pomocí 3D optodigitálního mikroskopu Olympus DSX 510. Jak je možno vidět na Obr. 49, vznikl pod působením vodního paprsku a kavitační eroze znatelný kráter. Ten byl následně detailně zvětšen Obr. 50. Vybraná část kráteru se 600x zvětšila. Na tomto zvětšení byla provedena 3D topografie povrchu.

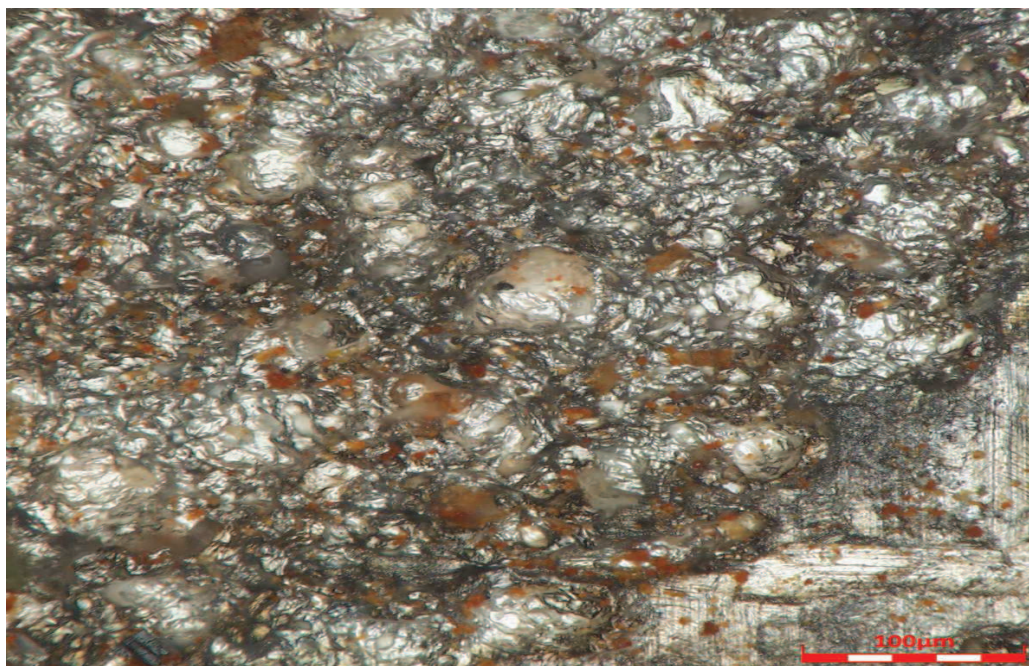


Obr. 48 Vzorek materiálu po 8 hodinovém experimentu

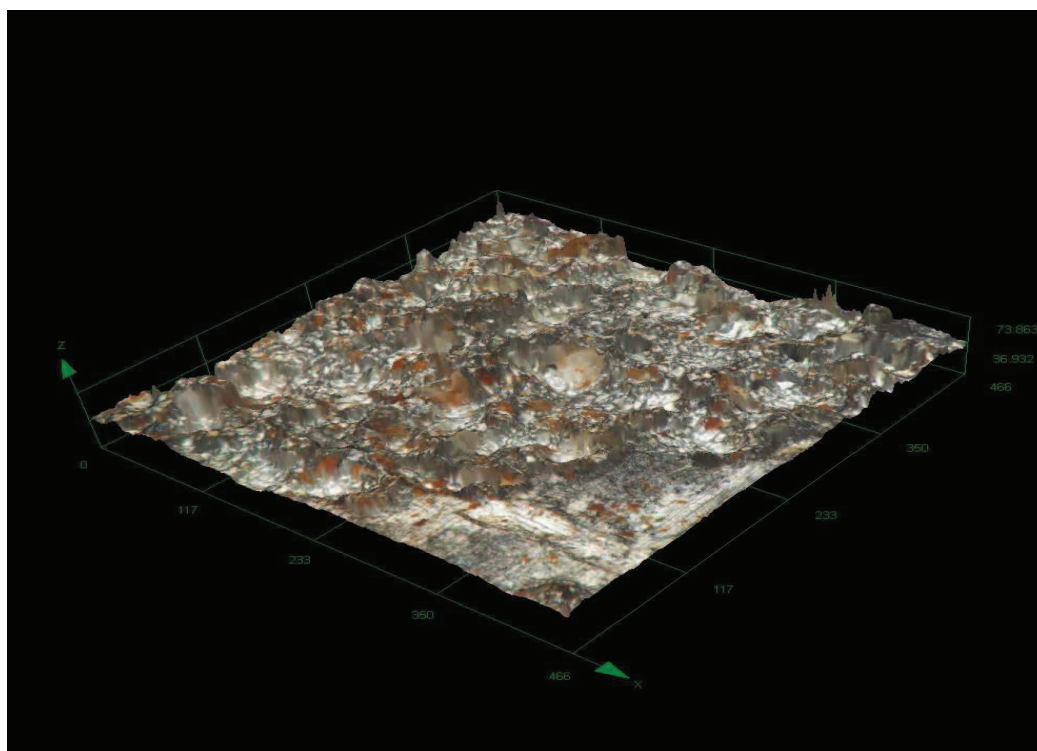


Obr. 49 Zvětšení kráteru po kavitační erozi

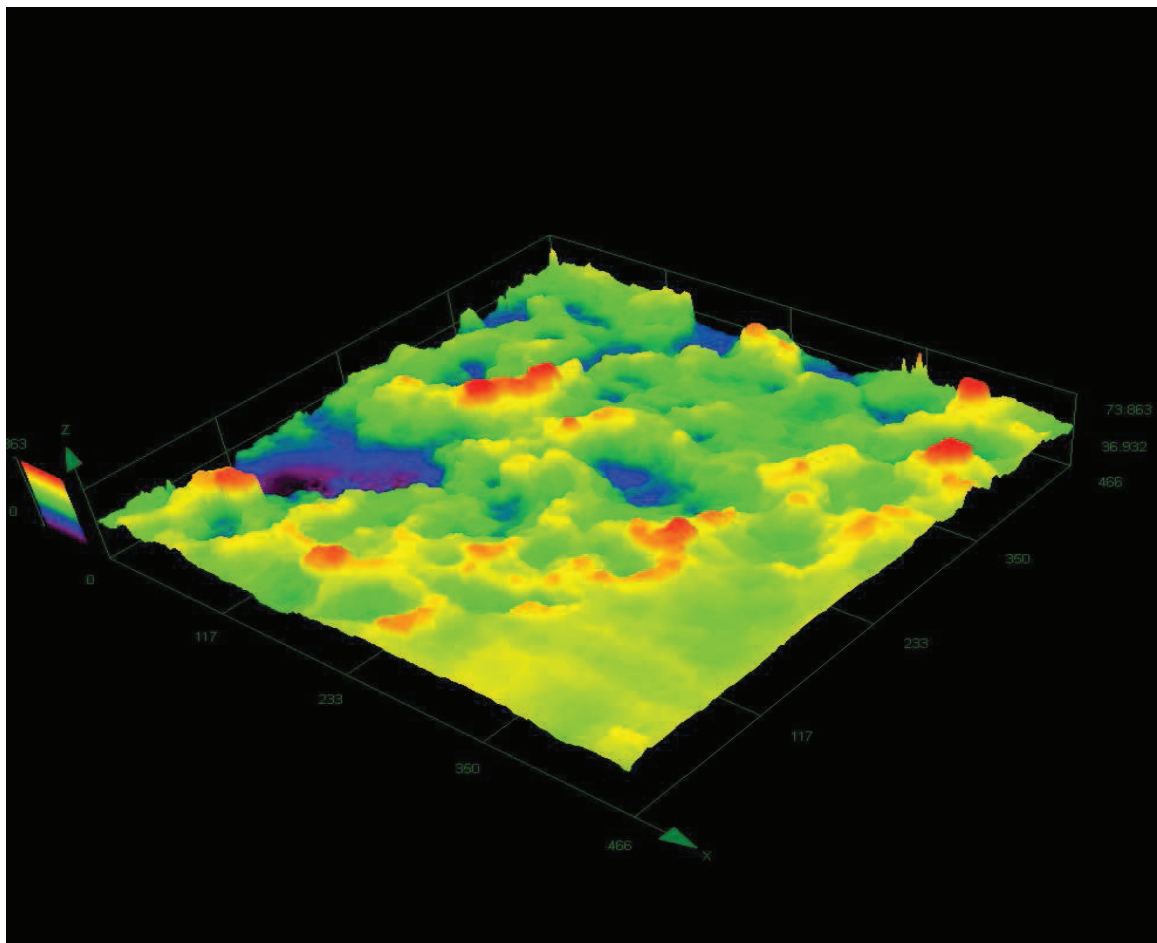
Na Obr. 51 je znázorněna 3D topografie povrchu a její následné barevné vyobrazení Obr. 52. Černé místo značí nejnižší bod na povrchu vzorku materiálu, označeno 0 v ose z. Červenou barvou je naopak nejvyšší místo na povrchu vzorku materiálu. To se v tomto případě nachází 863 μm nad nejnižším. Je zde vidět znatelná eroze materiálu, oproti původnímu experimentu 5.1, kde vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším místem byla 7,28 μm . Tímto se potvrdil předpoklad, že by mohlo dojít ke kavitační erozi.



Obr. 50 600x zvětšení části kráteru



Obr. 51 3D topografie povrchu



Obr. 52 Barevné vyobrazení 3D topografie povrchu

5.5.2 Vyhodnocení drsného vzorku materiálu umístěného ve vzdálenosti 10 mm pod hladinou

Na zdrsňeném vzorku materiálu byl po 8 hodinách zjištěn úbytek materiálu 0,02 g. Nebyla však pozorována okem viditelná eroze materiálu, proto vzorek materiálu nebyl dále vyhodnocován jako v předchozím případě.

6. Výpočtové modelování dopadu paprsku na rotující stěnu

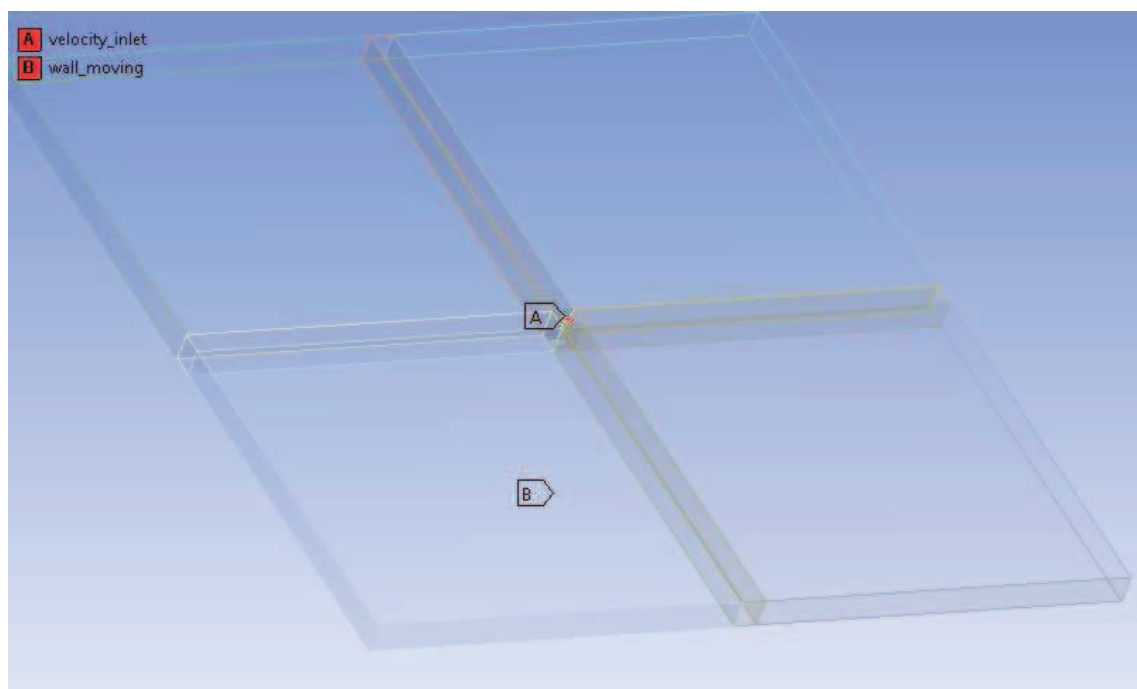
K ověření analyticky vypočítané síly při dopadu proudu kapaliny na pevnou stěnu:

$$F = \rho S v^2 = 998 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0027^2}{4} \cdot 21,75^2 = 2,703 \text{ N} \quad (14),$$

byly zvoleny dva přístupy. První z nich byl 3D přístup, kdy paprsek dopadá na pevnou nepohyblivou stěnu. Druhý případ byl, když paprsek dopadal na pohyblivou stěnu. Oba dva přístupy byly řešeny jako dvoufázové modely. První fází byla voda a druhou fází vzduch. Vyhodnocovalo se také rozložení tlaku a smykového napětí na dopadové ploše.

6.1. Výpočetní doména

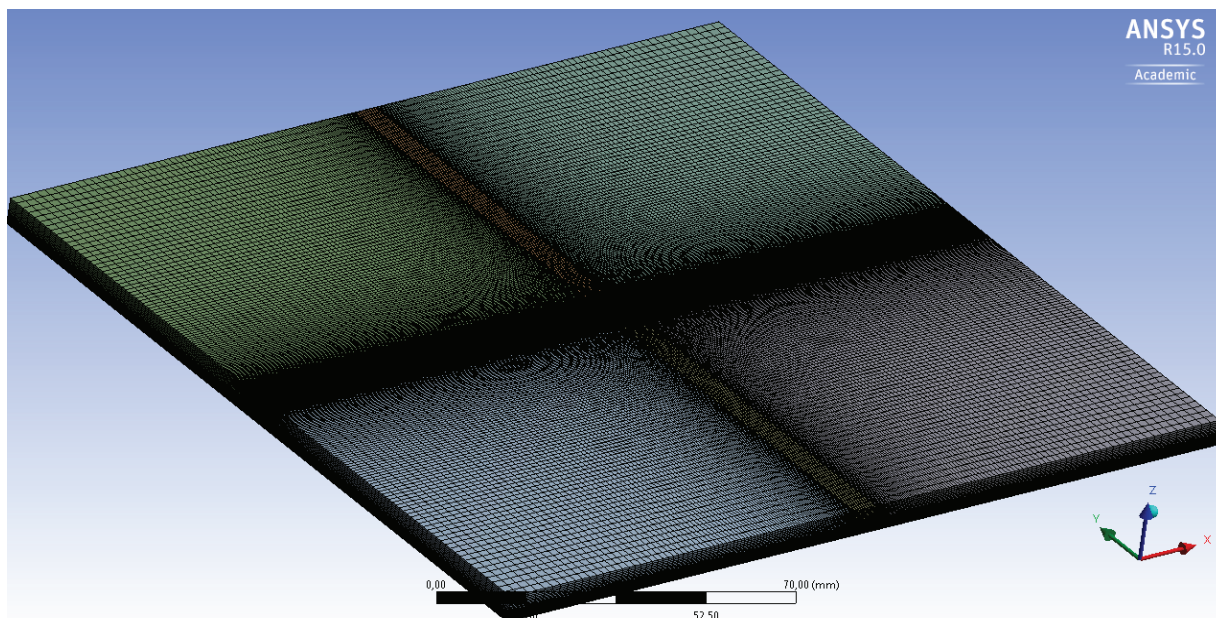
Výpočetní doména byla zvolena tak, aby mohla vzniknout co nejlepší výpočetní síť. Výslednou dekompozici je možno vidět na Obr. 53. Písmenem A je označena okrajová podmínka velocity_inlet, písmenem B pak okrajová podmínka wall_moving (celá spodní strana výpočtové domény). Na zbytku okrajových ploch výpočtové domény se nachází podmínka pressure_outlet. Rozměry výpočetní domény byly 85x85x6 mm. Průměr okrajové podmínky velocity_inlet odpovídal průměru trysky v experimentu, a to 2,7 mm.



Obr. 53 výpočetní doména a rozložení okrajových podmínek

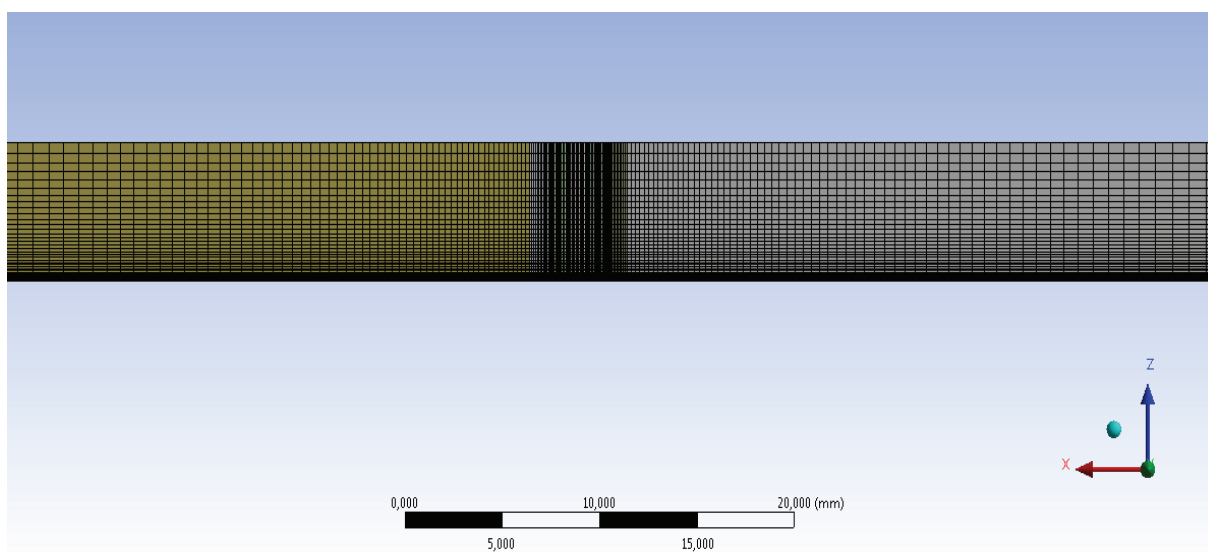
6.2 Výpočetní síť

Výpočetní síť byla tvořena 1,56 milióny prvky Obr. 54. Důraz byl kladen převážně na kvalitu výpočetní sítě. Síť byla tvořena pouze quad prvky.



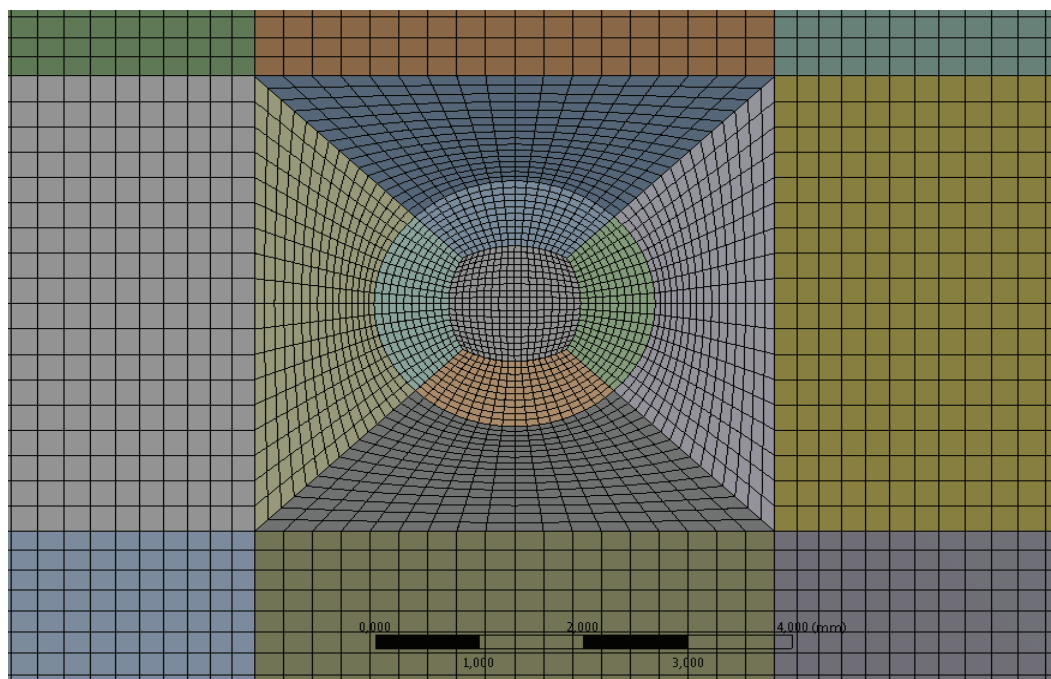
Obr. 54 Výpočetní síť

Snahou bylo, aby se výpočetní síť zhušťovala směrem k trysce. Všechna zhuštění se prováděla pomocí funkce „bias“. Důvodem tohoto zhuštění bylo dosažení co nejlepšího zachycení proudění při výstupu z trysky Obr. 55.

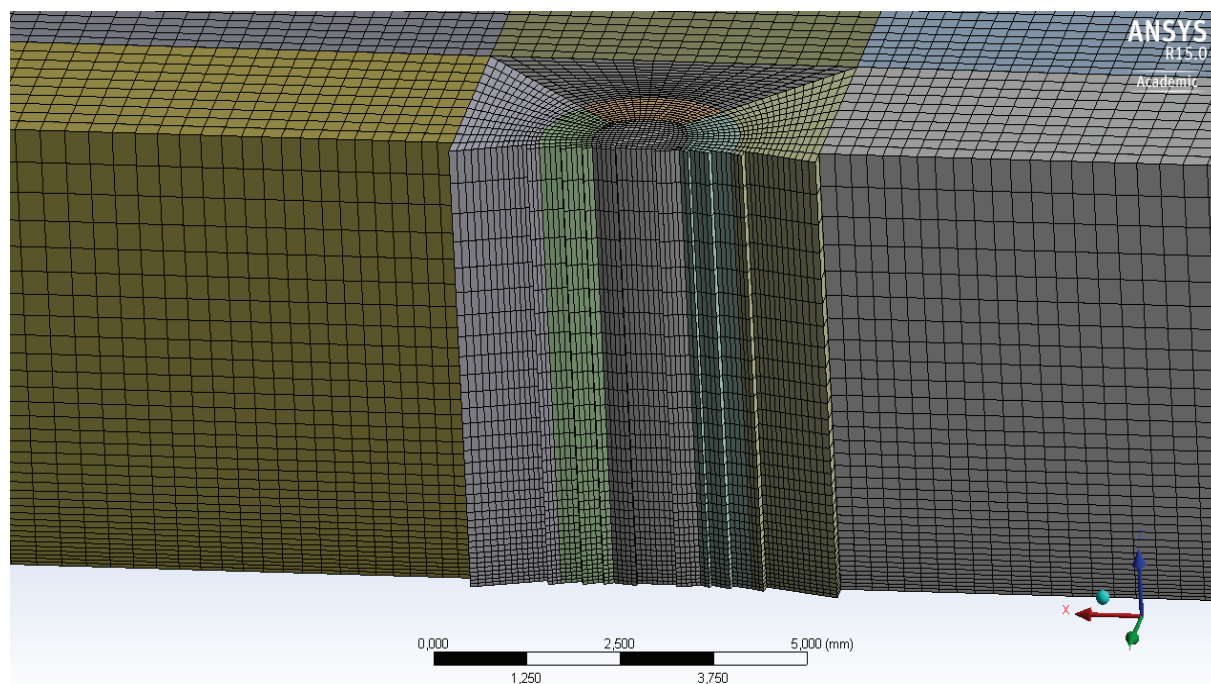


Obr. 55 zhuštění sítě směrem k trysce

Ze stejného důvodu se síť zhušťovala i dolů směrem ke stěně, aby bylo správně vypočítáno proudění kapaliny v místě dopadu kapaliny na pohyblivou plochu. Detail sítě v místě trysky ukazuje Obr. 56 a Obr. 57.



Obr. 56 Detail sítě I v místě trysky s provedenou dekompozicí



Obr. 57 Detail sítě II v místě rysky

Okrajové podmínky

- **Velocity_inlet** - Na vstupu do domény byla okrajová podmínka velocity_inlet, tato okrajová podmínka definuje velikost vstupní rychlosti do domény, spolu se všemi skalárními vlastnostmi daného proudění při vstupu. Celkové vlastnosti proudění však nejsou pevné a můžou nabývat jakýchkoliv hodnot, které jsou nezbytné pro správné předepsání rozložení rychlosti.
- **Wall** - Okrajová podmínka wall se používá k určení hranic mezi kapalinou a pevným povrchem. Na této okrajové podmínce platí podmínka ulpívání kapaliny. Tato okrajová podmínka značila hrany trysky.
- **Axis_symmetry** - Okrajová podmínka Axis_symmetry značí, že výpočtová doména je rotačně osově symetrická podle osy x.
- **Moving_wall** - Na spodní straně byla podmínka pohyblivé stěny moving wall. Tato okrajová podmínka byla definována tak, že byla specifikována rychlost stěny ve směru osy x, což simulovalo rotaci ramen.
- **Pressure_outlet** - Výstupní okrajovou podmínkou byl pressure outlet. Tato okrajová podmínka vyžaduje specifikaci statického přetlaku na výstupu z okraje domény. Hodnota specifikovaného statického tlaku je platná, pouze když proudění je subsonické. Pokud je proudění v nějakém místě domény supersonické, tak dále tato okrajová podmínka neplatí. Tlak je totiž extrapolován z proudění uvnitř domény. Všechny velikosti průtoku jsou také extrapolovány z vnitřku domény. Při dvoufázovém proudění vznikl zpětný průtok v této okrajové podmínce, což mělo za následek přívod vzduchu do domény.

Hodnoty okrajových podmínek:

<u>velocity_inlet:</u>	$v = 21,75 \text{ m/s}$
<u>pressure_outlet:</u>	$p = 0 \text{ Pa}$ (přetlak vůči atmosférickému tlaku)
<u>moving_wall:</u>	$v = 42,8 \text{ m/s}$

6.3 Výpočetní model

Výpočet řešeného problému byl prováděn v programu Fluent 15. Byl prováděn 3D výpočet dvoufázového proudění voda-vzduch. K tomuto typu proudění byl použit výpočtový model turbulence Realizable k- ϵ model a pro dvoufázové proudění model Volume of Fluid.

Realizable k- ϵ model

Pro výpočet byl použit dvourovnicový model turbulence realizable k- ϵ model. Tento model se liší od standardního k- ϵ modelu turbulence ve dvou důležitých věcech:

- obsahuje novou formulaci pro turbulentní viskozitu
- nová transportní rovnice pro turbulentní disipaci ϵ byla odvozena z exaktní rovnice pro transport střední kvadratické fluktuace vířivosti.

Výraz, „realizable“ znamená, že model splňuje určitá matematická omezení pro Reynoldsovo napětí v souladu s fyzickou podstatou turbulentního proudění. Ani standard k- ϵ model, ani RNG k- ϵ model, nejsou „realizable“. Výhodou tohoto modelu je přesnější předpověď vydatnosti kruhových a plošných trysek. Dále dosahuje vynikajících výsledků pro proudění obsahující rotaci, pro mezní vrstvu zatíženou silným nepříznivým tlakovým gradientem, separaci a pro recirkulaci.

Volume of Fluid

Protože se jednalo o dvoufázové proudění voda-vzduch, byl dále použit výpočtový model pro vícefázové proudění: Volume of Fluid (VOF). VOF model může modelovat dvou a vícefázové nemísitelné proudění řešením jedné sady hybnostních rovnic a sledováním objemového podílu každé fáze při proudění v doméně. Typickou aplikací tohoto modelu, včetně předpovědi rozpadu paprsku, je pohyb velkých bublin v kapalině, pohyb kapaliny při protržení přehradu a stálé nebo přechodné sledování rozhraní kapalina-plyn. VOF model se používá převážně pro časově závislé řešení, ale je možné ho použít i pro ustálené, časově nezávislé výpočty. To lze však rozumně použít pouze pro případy, kdy výsledné řešení není závislé na vstupních podmínkách a jsou zde zřetelné okrajové podmínky mezi jednotlivými fázemi. Například, pokud tvar volné hladiny uvnitř rotující nádoby závisí na její počáteční výšce, potom takový problém musí být řešen jako časově závislý. Pokud však voda proudí uvnitř kanálu a vzduch se nachází v oblasti nad vodou, se samostatným přívodem vzduchu, pak lze použít časově nezávislý výpočet. Formulace VOF je založena na podstatě, že se dvě nebo více kapalin (nebo fází) navzájem nemísí. Při přidání další fáze do řešeného problému vzniká v každé buňce výpočetní sítě nová proměnná, a to objemový podíl fáze. V každém kontrolním objemu se pak objemové podíly jednotlivých fází sčítají dohromady. Pole všech proměnných a vlastností jsou sdílena fázemi a představují hodnoty objemových průměrů, tak dlouho, dokud objemový podíl každé fáze není znám v každém místě. Tím pádem proměnné a vlastnosti v jakékoliv buňce jsou buď čistě zástupcem jedné fáze, anebo směsí fází v závislosti na objemovém podílu fází. Jinak řečeno, pokud q^{th} je označení fáze a zlomek objemu kapaliny v buňce označen jako α_q , pak mohou nastat tyto tři možnosti:

- $\alpha_q = 0$ buňka je prázdná
- $\alpha_q = 1$ buňka je plná q^{th} kapaliny
- $0 < \alpha_q < 1$ buňka obsahuje rozhraní mezi q^{th} kapalinou a jednou nebo více dalšími kapalinami

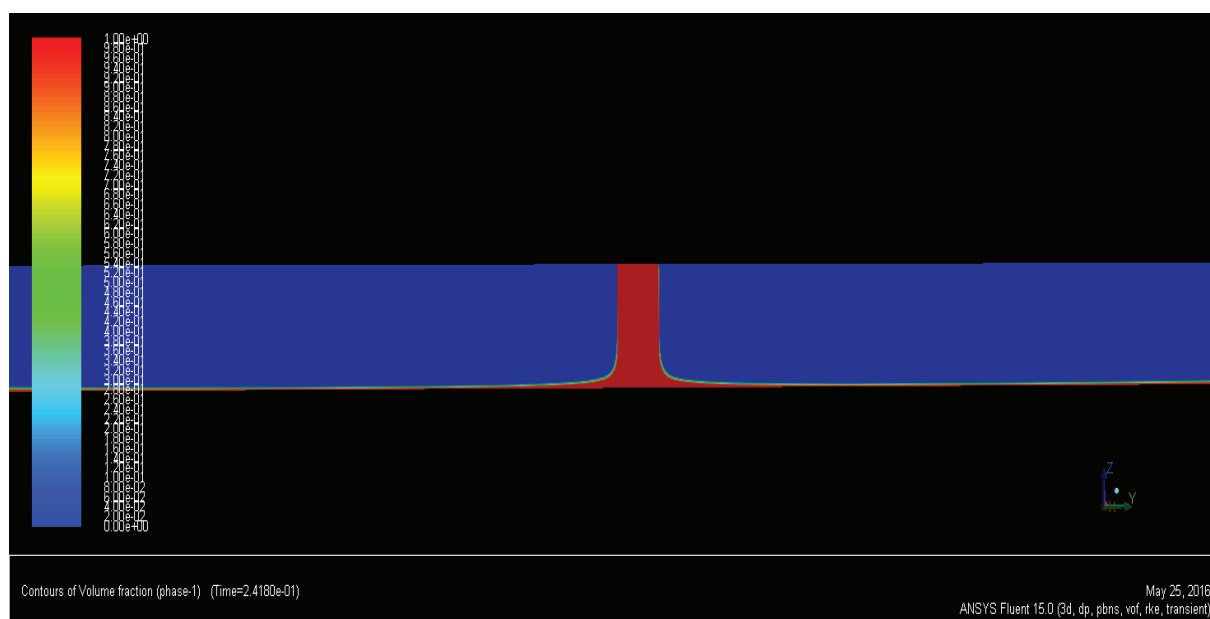
V závislosti na lokální hodnotě α_q budou proměnné a vlastnosti přiřazeny ke kontrolním objemům uvnitř domény.

6.4 Vyhodnocení výpočtu

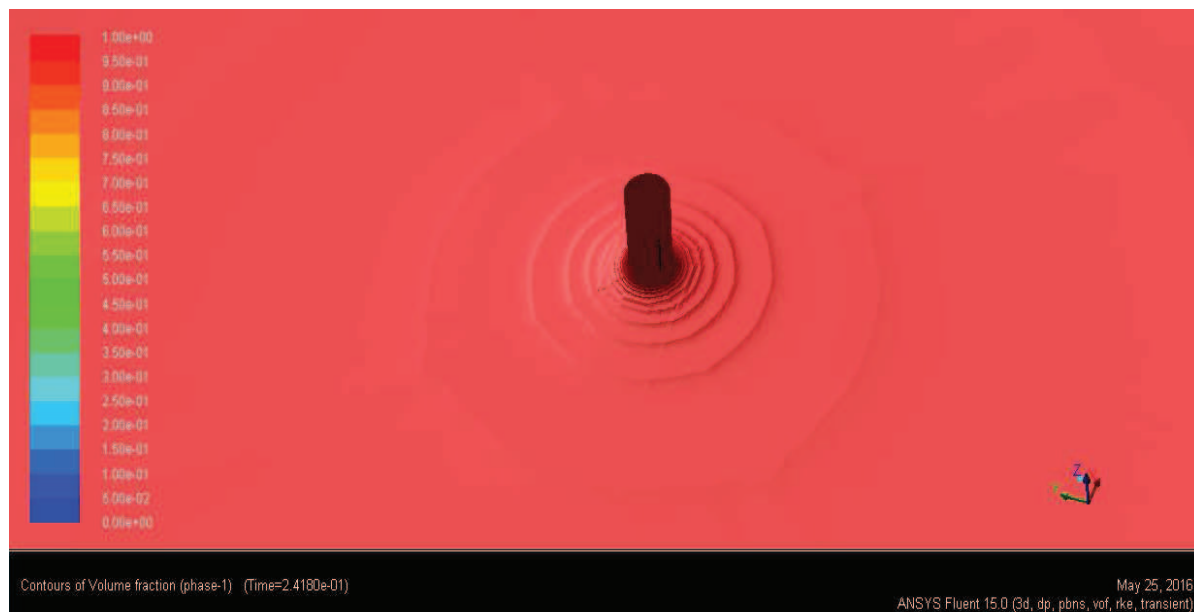
Výpočet byl prováděn ve třech fázích. V první fázi byl výpočet počítán jako časově nezávislý, tedy „steady“. Tento výpočet probíhal na první a druhé řády přesnosti. V další, druhé fázi, byla úloha řešena jako nestacionární, tedy „transient“. Výpočet opět probíhal na první a druhé řády přesnosti. Pro dostatečné přesnosti výsledků byl výpočet nastaven jako dvoufázový model proudění Volume of Fluid. Tento výpočetní model je popsán výše. Úloha byla stále řešena jako nestacionární. I při tomto nastavení byla úloha řešena na první a druhé řády přesnosti. Ve všech třech fázích byl použit výpočetní model turbulentního proudění Realizable k- ϵ model, který je také popsán výše. Časový krok při nestacionárním výpočtu byl 0,0001 s.

6.4.1 Nepohybující se stěna

Obr. 58 ukazuje rozložení poměru jednotlivých fází ve výpočetní doméně, 0 (modrá barva) značí čistě vzduch a 1 (červená barva) představuje čistě vodu. Jak je vidět, voda proudí do všech směrů stejně a rovnoměrně se roztéká po nepohyblivé stěně. Podél této stěny pak proudí směrem ven z výpočetní domény. Tento jev potvrzuje i Obr. 59, kde je možno sledovat čistě kapalnou fázi (vodu) ve výpočetní doméně ve 3D.

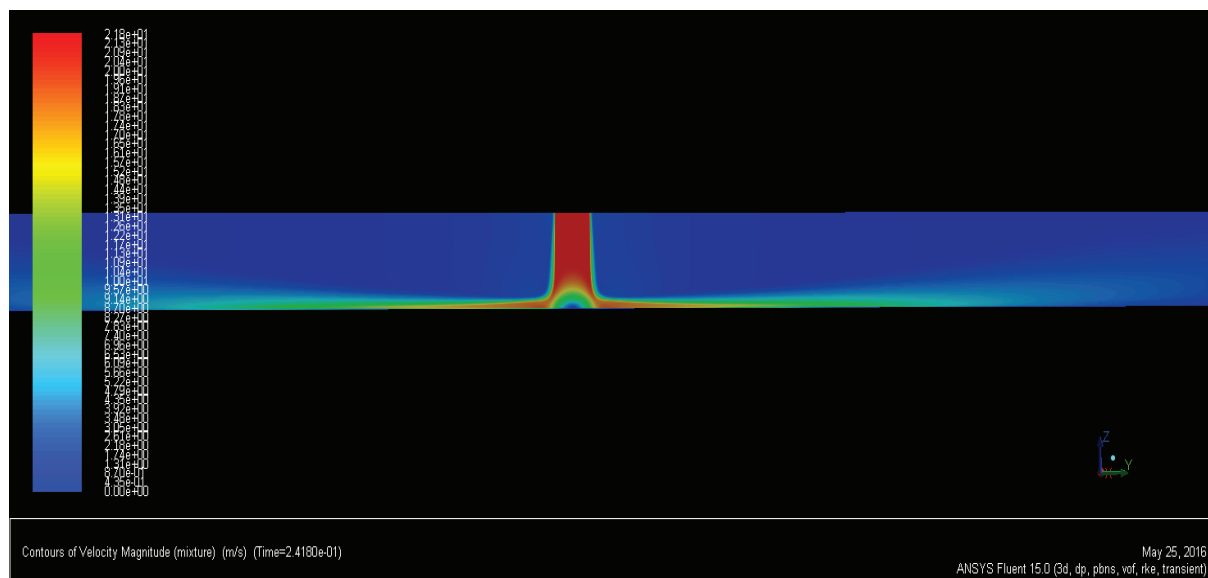


Obr. 58 Rozložení fází v rovině YZ



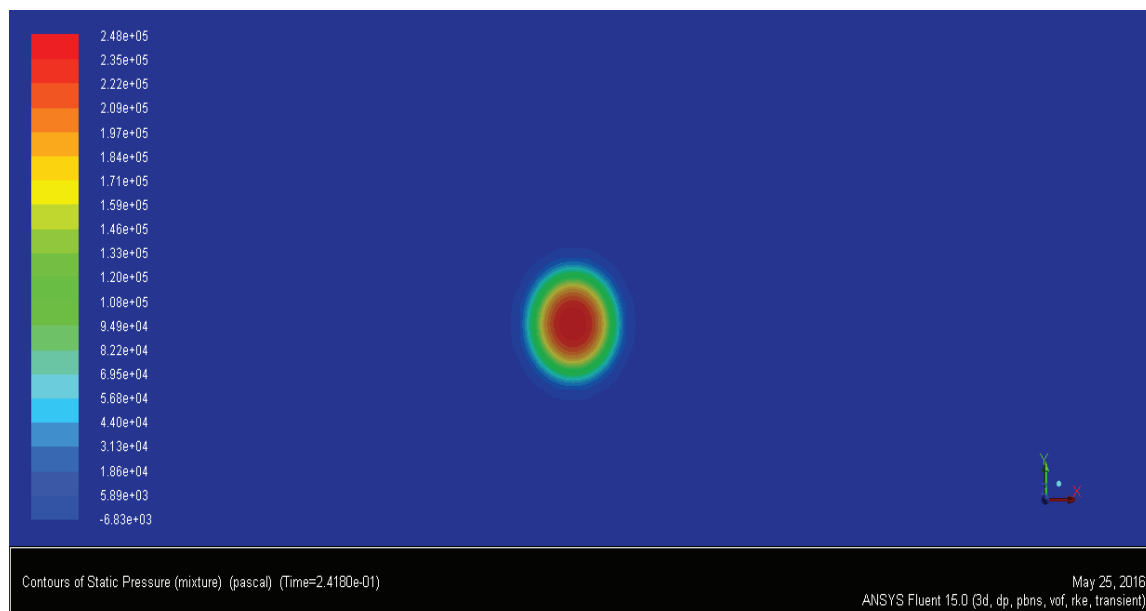
Obr. 59 Rozložení vody ve 3D

Na dalším Obr. 60 je pak zobrazeno rozložení rychlostí napříč výpočetní doménou. Nejvyšší rychlost vody je na vstupu do výpočetní domény a při dopadu na stěnu. Přimo pod dopadem ze vstupu je však rychlost vody nulová z toho důvodu, že nemůže projít stěnou dál, a tak se zastaví. Rychlost kapaliny se dále ve směru od jejího vstupu zmenšuje.



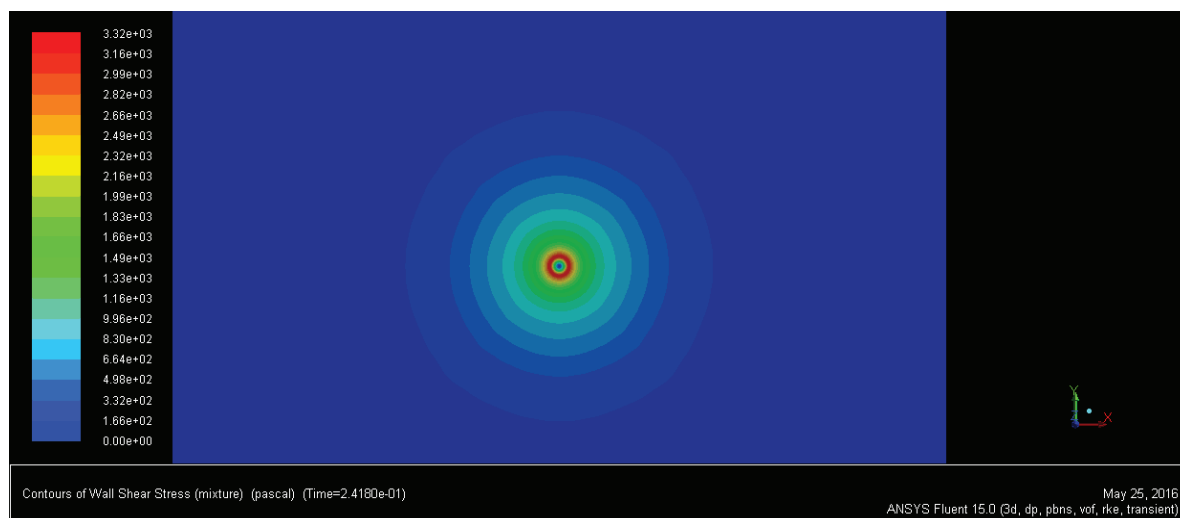
Obr. 60 Rozložení rychlostí ve výpočetní doméně

Další sledovanou veličinou bylo rozložení tlaku na dopadové stěně Obr. 61. Nejvyšší tlak se nachází v místě dopadu vody na nepohybující se stěnu, a to 248 000 Pa. Dále se tlak po dopadové stěně už jen snižuje.



Obr. 61 Rozložení tlaku v místě dopadu paprsku

Zkoumány byly i hodnoty smykového napětí, které vzniká při dopadu vodního paprsku a jeho proudění po nepohybující se stěnu (Obr. 62). Smykové napětí je rovnoměrně rozloženo ve všech směrech. Největší smykové napětí bylo dosaženo v červené oblasti, mělo hodnotu 3321 Pa.



Obr. 62 Rozložení smykového napětí

Velikost síly při dopadu na nepohybující se stěnu je $F = 2,708 \text{ N}$ (Obr. 63). Tato velikost je prakticky stejná jako při analytickém vztahu.

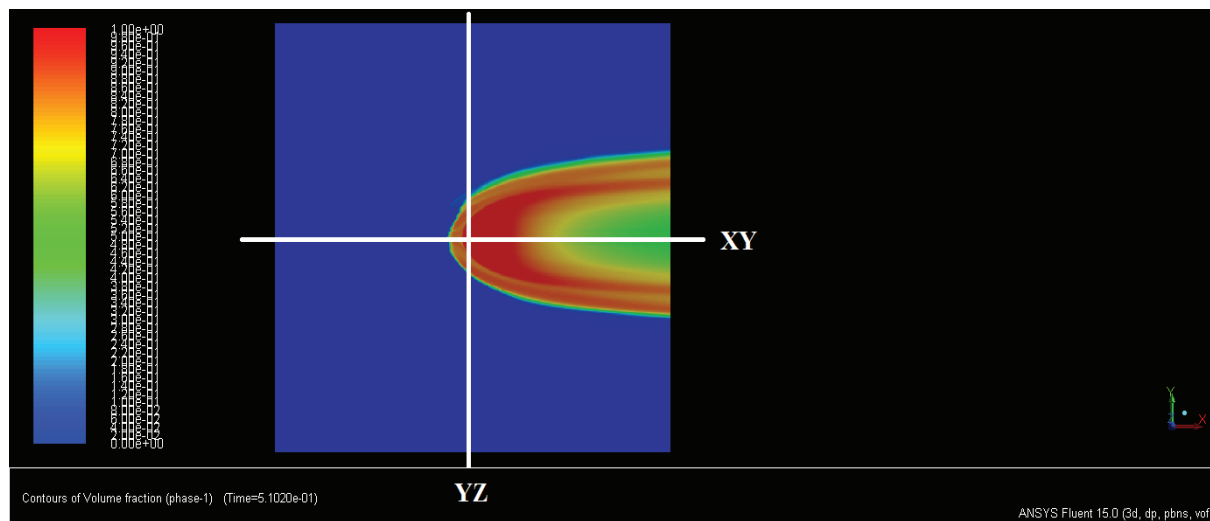
Forces - Direction Vector (0 0 1)						
Zone	Forces (n)			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
wall_moving	-2.7086761	0	-2.7086761	-4.4223282	0	-4.4223282
Net	-2.7086761	0	-2.7086761	-4.4223282	0	-4.4223282

Obr. 63 Velikost síly při dopadu na nepohybující se stěnu

6.4.2 Pohybující se stěna

Nastavení výpočtu bylo totožné jako v případě nepohyblivé stěny. Jediný rozdíl byl ten, že spodní pevná stěna (okrajová podmínka wall_moving) se pohybovala rychlostí $v = 42,8 \text{ m/s}$ ve směru osy x.

Výpočetní doména se vyhodnocovala ve dvou rovinách a to podle XZ a YZ (Obr. 64). Okrajová podmínka velocity_inlet se nachází v místě, kde se tyto roviny protínají. Tento obrázek ukazuje rozložení fází na dopadové pohybuující se stěně. Jak je možno vidět, kapalina je unášena po stěně. Rychlost stěny je ve směru osy x.



Obr. 64 Rozložení rychlosti ve výpočetní doméně

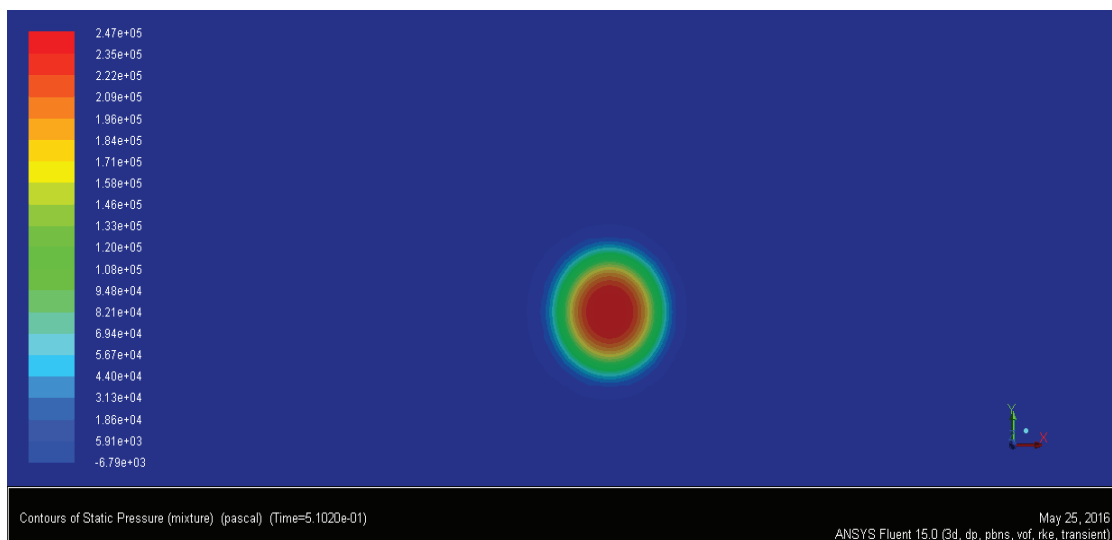
Detailnější rozložení proudící vody je možno vidět ve 3D (Obr. 65). Tento obrázek ukazuje poměr fáze 0,98 až 1 v doméně, což značí čistě vodu. Naprosto shodně jako při pohledu shora, kapalina proudí ve směru pohybuující se stěny, tedy ve směru osy

x. Zde je vidět jasný rozdíl oproti případu s nepohybující se stěnou, kde voda proudila rovnoměrně do všech směrů.

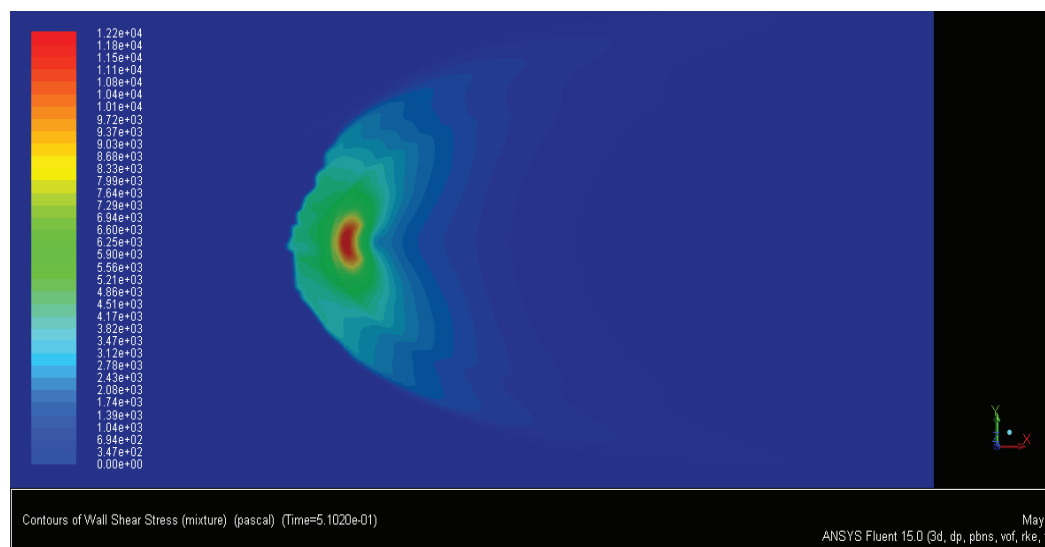


Obr. 65 Rozložení vody ve 3D

Obr. 66 pak ukazuje rozložení tlaku na pohybuující se stěně. Nejvyšší hodnoty dosahuje tlak v místě dopadu paprsku, jeho hodnota je 247 000 Pa, což je prakticky shodné s nepohybující se stěnou.



Obr. 66 Rozložení tlaku na pohybuující se stěně



Obr. 67 Rozložení smykového napětí na pohybující se stěně

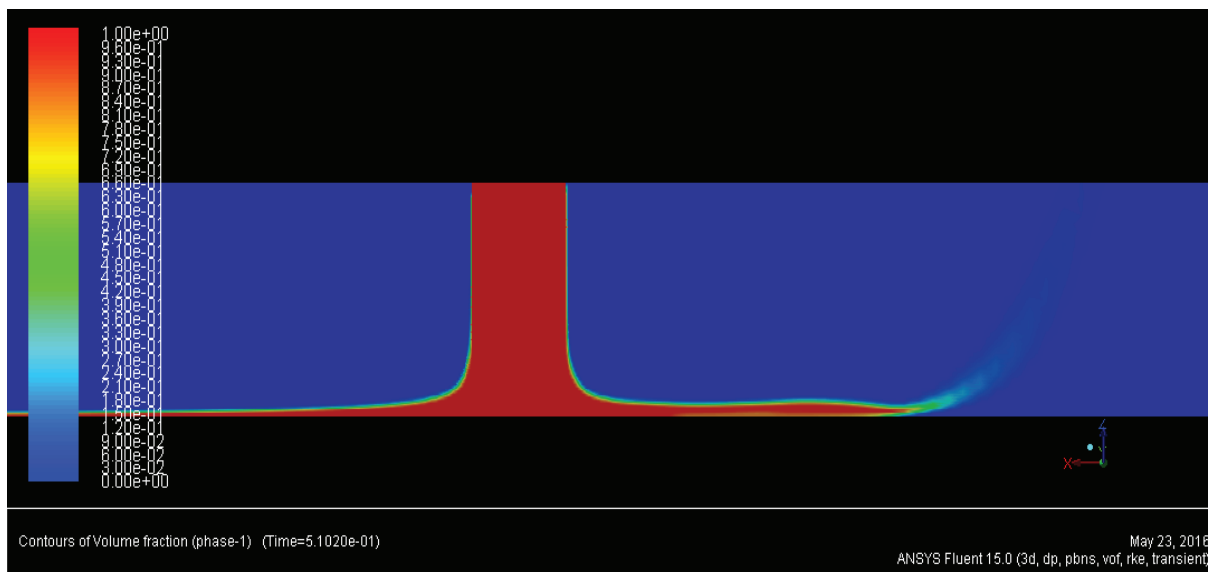
Na Obr. 67 je možno vidět rozložení smykového napětí na pohybující se stěně. Oproti smykovému napětí na nepohybující se stěně jsou vidět značné rozdíly. Například nejvyšší hodnota smykového napětí byla 12 152 Pa, to je 4x větší, než v přecházejícím případě. To znamená, že kromě samotného impaktního tlaku by materiál mohlo porušovat i smykové napětí.

Vyhodnocení v rovině XZ:

Obr. 68 ukazuje rozložení poměru jednotlivých fází ve výpočetní doméně. Rychlost pohybující se stěny je v kladném směru osy x. Jak je vidět, voda ze začátku proudí do všech směrů stejně, protože je však její rychlost menší, než rychlost pohybující se stěny, začne se voda na pravé straně zvedat a zvýší se trochu její hladina. Na levé straně je kapalina unášena pohyblivou stěnou ven z výpočetní domény. Na Obr. 69 je pak možno vidět detail rozložení poměru jednotlivých fází v místě dopadu kapaliny na pevný povrch.

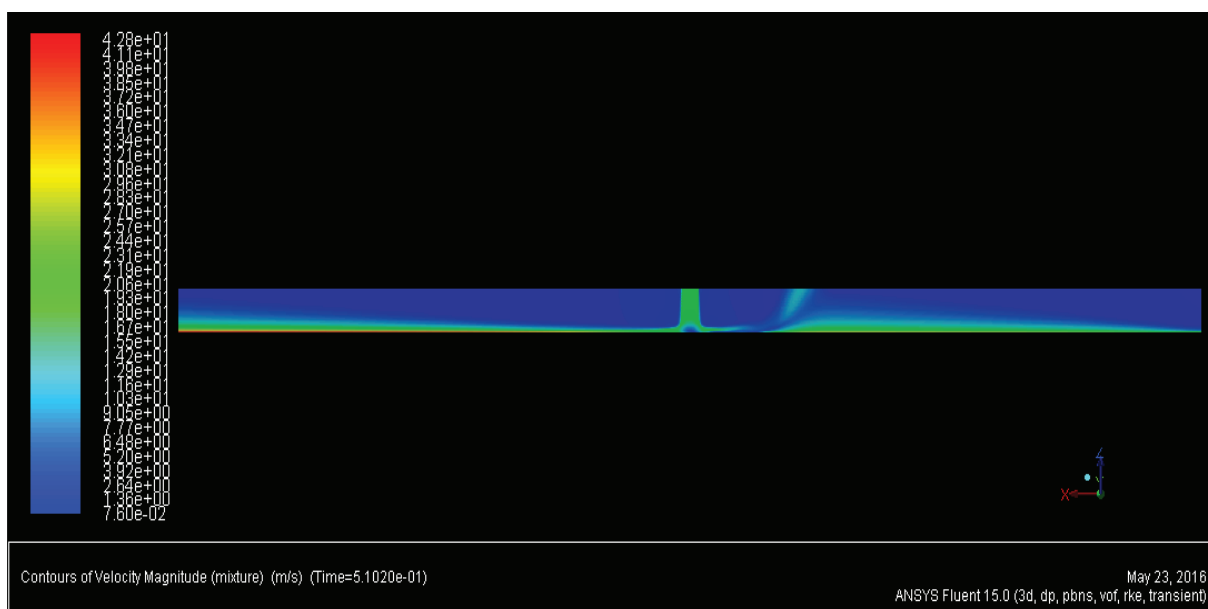


Obr. 68 Rozložení fází v rovině XZ

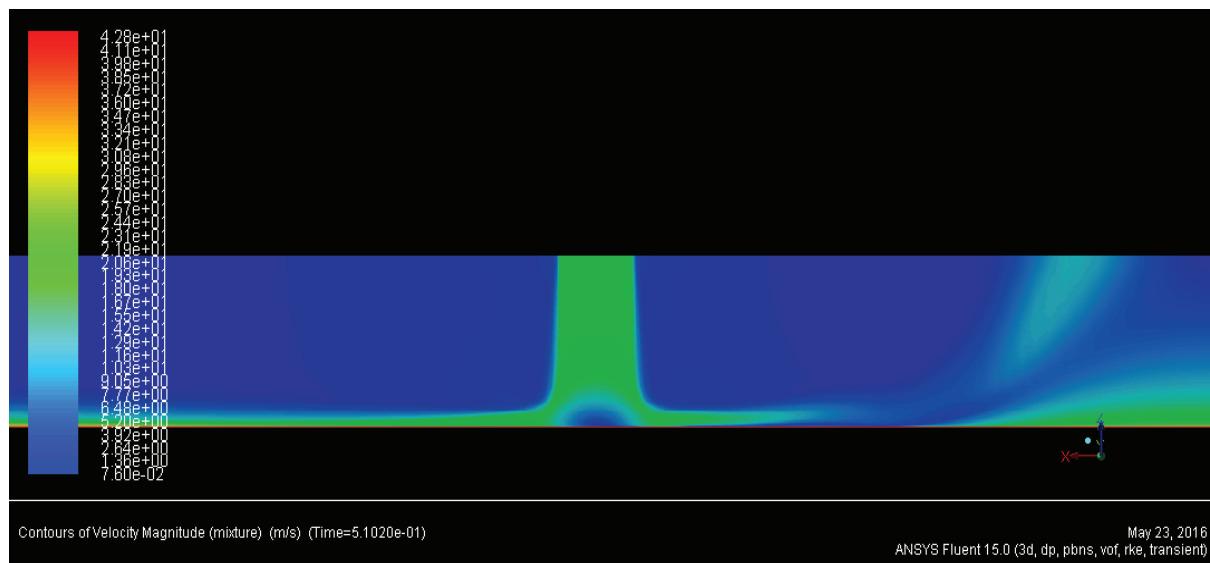


Obr. 69 Detail rozložení fázi v místě dopadu vody na pohyblivou stěnu

Na dalším Obr. 70 je pak zobrazeno rozložení rychlostí napříč výpočetní doménou. Voda má nejvyšší rychlost v okolí pohybující se stěny. V pravé části výpočetní domény je opět vidět místo, kde rychlost pohybující se stěny obrací rychlost vody. Obr. 71 pak ukazuje detail v místě dopadu vody na pohyblivou stěnu.



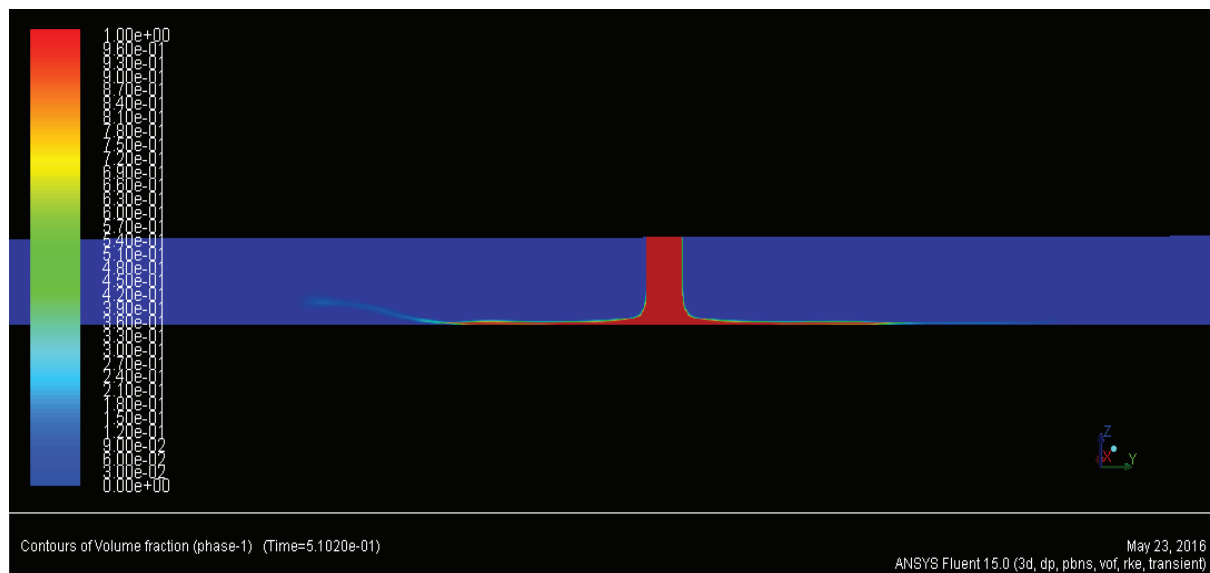
Obr. 70 Rozložení rychlostí ve výpočetní doméně



Obr. 71 Detail rozložení rychlostí v místě dopadu vody na pohybující se stěnu

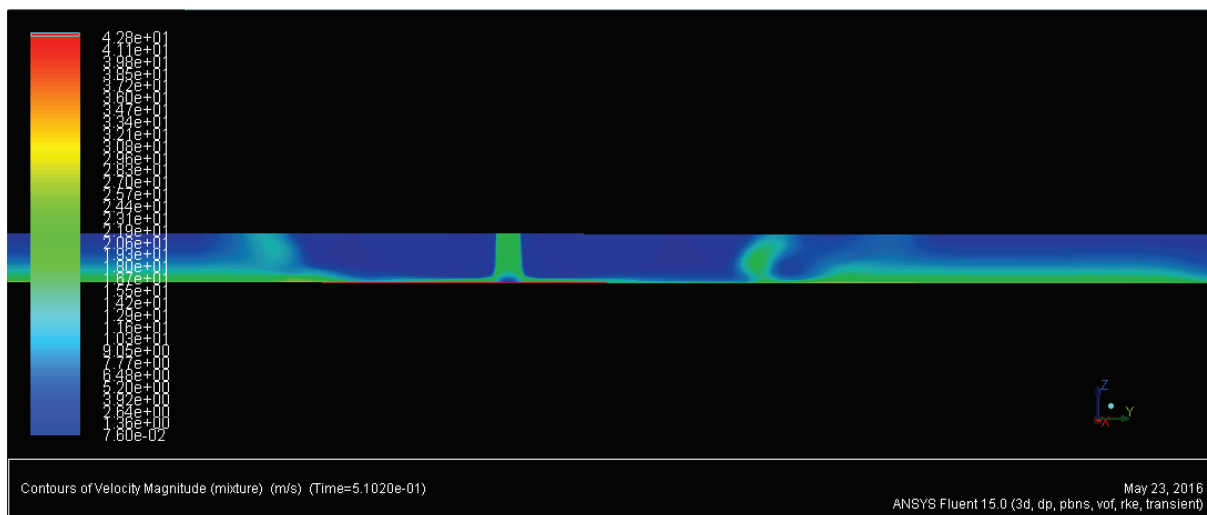
Vyhodnocení v rovině YZ

V této rovině bylo provedeno obdobné vyhodnocení jako v rovině XZ. Obr. 72 zobrazuje rozložení poměru jednotlivých fází ve výpočetní doméně. Je vidět, že voda proudí do obou stran stejně. Následně je voda unášena ve směru osy x, proto v rovině YZ neproudí ven z domény ven.



Obr. 72 Rozložení poměru jednotlivých fází v rovině YZ

Obr. 73 ukazuje rozložení rychlostí napříč výpočetní doménou v rovině YZ. Nejvyšší rychlosti se nachází opět v místě pohybující se stěny.



Obr. 73 Rozložení rychlostí v rovině YZ

Na Obr. 74 je vidět velikost síly působící na pohybující se stěnu. Síla je záporná, protože působí proti kladnému směru osy Z. Síla má velikost $F = 2,919 \text{ N}$, což je lehce větší, než síla při dopadu na pevnou stěnu a síla daná analytickým vztahem. Rozdíl je však tak malý, že při reálném experimentu by neměl být při stejných podmínkách znatelný rozdíl v opotřebení materiálu.

Forces						
Zone	Forces (n)			Viscous		
wall_moving	Pressure					
	(0 0 -2.9193193)			(-4.1443314 0.026602035 0)		
Net	(0 0 -2.9193193)			(-4.1443314 0.026602035 0)		
Forces - Direction Vector (0 0 1)						
Zone	Forces (n)			Coefficients		
wall_moving	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	Total
	-2.9193193	0	-2.9193193	-4.7662356	0	-4.7662356
Net	-2.9193193	0	-2.9193193	-4.7662356	0	-4.7662356

Obr. 72 Velikost síly působící na pohybující se stěnu

7. Závěr

Tato diplomová práce se zabývala studiem dopadajícího vodního paprsku na materiál a tím, jaká deformace tento jev provází. Cílem diplomové práce bylo navržení zařízení pro erozi materiálu vodním paprskem na rotujícím vzorku a provedení experimentu. Dalším úkolem bylo zjistit pomocí výpočtového modelování chování vodního paprsku při dopadu na pohybující se stěnu, rozložení tlaku a smykového napětí na dopadové stěně.

První část diplomové práce se zabývala teoretickou částí dopadu vodního paprsku. V této části bylo vysvětleno chování vodního paprsku v jednotlivých fázích dopadu a jeho struktura. Dále byl zkoumán povrch materiálu po účinkování stálého a přerušovaného vodního paprsku. V poslední části diplomové práce bylo porovnáno testování odolnosti materiálu proti kavitační erozi s odolností materiálu proti vodnímu paprsku dopadajícímu na rotující rameno.

Z důvodů velice dobrých erozivních účinků dopadajícího vodního paprsku na materiál připevněný k rotujícímu ramenu, prezentovaných v teoretické části dle literatury [10,11], bylo rozhodnuto navrhnout obdobný experiment. Bylo navrženo zařízení pro erozi vodním paprskem na rotujícím vzorku. Materiálem vzorku byla měď, průměr trysek v zařízení byl $d = 2,7 \text{ mm}$ a vzdálenost mezi tryskou a vzorkem byla 6 mm . Na tomto zařízení byly provedeny celkem 4 experimenty. První experiment byl pro tlak vody v okruhu $0,435 \text{ MPa}$, doba experimentu byla 8 hodin. Při druhém experimentu platily stejné podmínky, pouze se zvýšila doba jeho trvání na 16 hodin z důvodu většího počtu dopadových cyklů. Voda v tomto nastavení byla odebírána z vodovodního řádu. Ani u jednoho z těchto dvou experimentů nebylo na vzorku mědi pozorováno erozivní poškození a nebyl změřen úbytek hmotnosti, proto se přistoupilo k zvýšení tlaku vody v okruhu. Tlak vody v okruhu se zvýšil na $1,5 \text{ MPa}$, toho bylo docíleno 15-ti článkovým čerpadlem SV 1615 F150T, které bralo vodu z nádrže, ta se do ní po průchodu okruhem vracela nazpět. V tomto nastavení byly provedeny též dva experimenty. Doba jejich trvání byla 8 a 16 hodin. Opět ani v jednom případě nebyl zjištěn hmotnostní úbytek, ani vizuální poškození. K docílení eroze materiálu došlo změnou návrhu experimentu. Byl použit nový materiál vzorku, a to hliník. Nahrazeny byly i původní trysky za nové o průměru $d = 1 \text{ mm}$, ty byly vyrobeny v laboratoři Oboru fluidního inženýrství. Tlak vody v okruhu byl zvýšen na $2,5 \text{ MPa}$. Vzorek materiálu společně s tryskami byl pevně uchycen v přípravku. Provedly se celkově 4 experimenty pro toto nastavení. U prvních dvou vzdálenost mezi tryskou a vzorkem byla 10 mm , testoval se hladký a zdrsňený vzorek. Ani u jednoho z nich nebyl zjištěn hmotnostní úbytek, také nebylo pozorováno vizuální poškození. Doba testování byla 8 hodin. V dalších dvou experimentech se posunula vzdálenost mezi tryskou a vzorkem na 100 mm . Opět se provedl 8 hodinový test pro hladký a zdrsňený vzorek. Na hladkém vzorku bylo poprvé zjištěno vizuální poškození a dokonce byl změřen i hmotnostní úbytek $0,01 \text{ g}$. U zdrsňeného vzorku bylo pozorováno pouze vizuální poškození, bez hmotnostního úbytku. Tento výsledek byl nejspíš dán rozpadem paprsku na menší kapičky, které měly na materiál větší erodující vliv, než plný paprsek. Poslední dva experimenty spočívaly v zanoření přípravku se vzorkem vzdáleným od trysky 10 mm pod vodu. Použit byl hladký a zdrsňený vzorek. Doba experimentu byla 8 hodin. Z důvodu dosažení velkých dopadových rychlostí byl předpokládán vznik kavitační eroze. U zdrsňeného vzorku došlo k úbytku materiálu o

0,02 g, ale nebylo pozorováno žádné vizuální poškození. Hladký vzorek měl úbytek materiálu 0,01 g, byl však pozorován jasně zřetelný kráter po erozi. Tento výsledek značí, že skutečně ke kavitační erozi došlo. Podrobné vyhodnocení vzorků po experimentech měl na starosti Ústav materiálových věd a inženýrství. Po zhodnocení výsledků je zřejmé, že dopadající vodní paprsek na rotující vzorek není úplně vhodný pro dané nastavení okruhu k získávání mikroprášku. K erozi materiálu na tomto zařízení by mohlo dojít při zvýšení tlaku v okruhu, změnou trysek za užší než je 2,7 mm, zdrsněním povrchu vzorku a zvýšením vzdálenosti mezi tryskou a vzorkem. K získání mikroprášku by se spíše mohlo použít posledního nastavení experimentu, kdy byl materiál i s tryskou zanořen pod vodou. Tento přístup by byl i méně energeticky náročný, protože při dopadu vodního paprsku na rotující disk musí být kromě čerpadla poháněn i elektromotor, ke kterému je přiděláno rameno se vzorky.

Závěrečnou částí diplomové práce bylo výpočtové modelování dopadajícího vodního paprsku. Byly provedeny dva výpočty. První z nich byl 3D výpočet dopadu vodního paprsku na pevnou nepohyblivou stěnu. Druhý výpočet byl také řešen jako 3D, kdy však vodní paprsek dopadal na pevnou stěnu, která se pohybovala rychlostí v ve směru osy x. Oba dva výpočty byly řešeny jako dvoufázové proudění voda - vzduch. Použitý výpočtový model na tento typ proudění byl Volume of Fluid. Výsledkem tohoto výpočtu bylo rozložení tlaků a smykového napětí na dopadové ploše.

8. Použitá literatura

- [1] SUCHÁNEK, Jan. *Erozivní opotřebení materiálů*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05532-8.
- [2] FOLDYNA, J., L. SITEK, J. ŠČUČKA, P. MARTINEC, J. VALÍČEK a K. PÁLENÍKOVÁ. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, **209**(20), 6174-6180. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.06.004. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609002325>
- [3] A GENERAL OVERVIEW OF WATERJET SURFACE TREATMENT MODELING. *American WJTA Conference and Expo* [online]. 2009, **2009**, 12 [cit. 2016-05-16].
- [4] HANCOX, N.L. a J.H. BRUNTON. THE PHYSICS OF IMPACT AND DEFORMATION: MULTIPLE IMPACT: The erosion of solids by the repeated impact of liquid drops. *Mathematical and Physical Sciences*. (260), 36.
- [5] KNEZEVIC, Kristian Haller. *High-Velocity Impact of a Liquid Droplet on a Rigid Surface: The Effect of Liquid Compressibility* [online]. Zurich, 2002 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:26251/eth-26251-02.pdf>. Dissertation.
- [6] FIELD, J.E., J.P. DEAR a J.E. OGREN. The effect of target compliance on liquid drop impact. *Physics and Chemistry of Solids*. 1989, **1987**(65), 10.
- [7] HUANG, L., J. FOLKES, P. KINNELL a P.H. SHIPWAY. Mechanisms of damage initiation in a titanium alloy subjected to water droplet impact during ultra-high pressure plain waterjet erosion. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2012, **212**(9), 1906-1915 [cit. 2016-04-26]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.04.013. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612001288>
- [8] THOMAS, G.P. The initial stages of deformation in metals subjected to repeated liquid impact. *Mathematical and Physical Sciences*. , 8.
- [9] FOLDYNA, Josef, Jiří KLICH, Petr HLAVÁČEK, Michal ZELENÁK a Jiří ŠČUČKA. Erosion of metals by pulsating water jet. *Tehnicki vjesnik*. 2012, **2**(19), 7. ISSN 1330-3651.
- [10] NECKER, J., P.F. PELZ a T. KEIL. Erosion im Tropfenschlagversuch – Vergleich zur Kavitationserosion. *Kolloquium zu Kavitation und Kavitationserosion*. 2014.
- [11] KEIL, T. a J. NECKER. Droplet Impact vs. Cavitation Erosion. *WIMRC 3rd International Cavitation Forum 2011*. 2011, , 8.
- [12] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-030-0206-0.

- [13] FLUENT 6.3 User's Guide. *Fluent Inc.* 2006, , 2501.
- [14] *SV / LK Pumpservice* [online]. Praha: LK Pumpservice, c1990-2016
[cit. 2016-05- 23]. Dostupné z:
<http://www.lkpumpservice.cz/index.php?typ=LMA&showid=89>

9. Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam použitých zkratk

CFD - výpočtové modelování proudění (Computational Fluid Dynamics)

VoF - výpočtový model proudění Volume of Fluid

Seznam použitých symbolů

p_i - normálový (impaktní) tlak	[Pa]
v - dopadová rychlost	[m/s]
ρ - hustota	[kg/m ³]
c - rychlost šíření tlakové vlny v kapalině	[m/s]
v_s - rychlost zvuku	[m/s]
k - numerická konstanta	[-]
p_s - Bernoulliho stagnační tlak	[Pa]
β - úhel mezi kontaktní hranou vodní kapky a dopadovým povrchem	[°]
$\Delta\tau$ - doba trvání impaktního tlaku	[s]
r - poloměr kapky v kontaktním regionu	[m]
d - vzdálenost mezi protilehlými otvory v disku	[m]
Ω - úhlová rychlost	[rad/s]
ν - kinematická viskozita	[m ² /s]
Re - Reynoldsovo číslo	[-]
σ - kavitační číslo	[-]
p - tlak v systému	[Pa]
p_v - tlak nasycených par	[Pa]
γ - mez kluzu v tahu	[MPa]
L_m - druhá typická délka materiálu	[m]
l_m - první typická délka materiálu (průměr zrna)	[m]
E - energie	[J]
f_T - počet pulsujících cyklů	[-]

F - síla od proudu kapaliny	[N]
S - dopadová plocha	[m ²]